



COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO E TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA
SETOR DE PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO DE CURSOS

CALIBRAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE AMOSTRAGEM EM CHAMINÉ

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA Prof. Dr. Lucas Nogueira Garcez
Av. Prof. Frederico Hermann Junior, 345 - Fênix I - C. J. P.
05489-000 - SÃO PAULO - BRASIL

SÃO PAULO
1995

SUMÁRIO

Introdução	1
Objetivo	2
Conceitos básicos	2
Tabela de conversão	2
Pressão do gás	4
Leis de um gás ideal	6
Número de Reynolds	7
Definição	7
Fluido laminar e turbulento	8
O que é fluido?	9
Medidores de volume, vazão e velocidades, calibração em geral	10
Calibração, cálculos e definições	11
Generalidades sobre medidores de vazão	11
Orifício - Fator de correção	15
Metodologia de calibração da placa de orifício	21
Generalidades sobre medidores de volume	22
Gasômetro úmido ou wet test meter	26
Gasômetro seco	28
Calibração do gasômetro seco	29
Tubos de Pitot	31
Generalidades e esclarecimentos	31
Procedimento de calibração do tubo de Pitot	39
Medição de vazão com tubo de Pitot	41
Referências bibliográficas	42
Anexos I, II e III	43
Anexo IV - Normas da CETESB nº E16.030 e E2.166	54

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

Vertical text on the left margin, possibly a page number or reference code.

Main body of text, appearing as a list or series of entries, possibly related to a technical or administrative document.

Large section of text, possibly a detailed report or a series of paragraphs, with some lines appearing bolded or highlighted.

Bottom section of text, possibly a conclusion or a summary, with some lines appearing bolded or highlighted.



LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> - Medida de pressão atmosférica - Experiência de Torricelli	6
<i>Figura 2</i> - Comparação entre F. e. e V. i.	12
<i>Figura 3</i> - Placa de orifício	16
<i>Figura 4</i> - Equipamento de amostragem de chaminé	16
<i>Figura 5, 5A e 6</i> - Espirômetro	23
<i>Figura 7</i> - Dispositivo padrão por escoamento líquido	25
<i>Figura 8 e 8A</i> - Cilindro de medição - gasômetro úmido	27
<i>Figura 9</i> - Esquema de calibração do gasômetro seco	30
<i>Figura 10</i> - Tubo de Pitot original	32
<i>Figura 11</i> - Tubo de Prandtl	32
<i>Figura 12</i> - Velocidade em função de $\sqrt{\Delta p}$ e ρ	33
<i>Figura 13</i> - Tubo de Pitot "Padrão"	34
<i>Figura 14</i> - Tubo de Pitot "S"	35
<i>Figura 15</i> - Tubo de Pitot "Cobra"	35
<i>Figura 16</i> - Esquema dos Pitots "Padrão" e "S"	41

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1</i> - Tabela de conversão 3A - Temperatura	2
<i>Tabela 2</i> - Tabela de conversão 3B - Vazão	3
<i>Tabela 3</i> - Tabela de conversão 3C - Peso	3
<i>Tabela 4</i> - Tabela de conversão 3D - Área	3
<i>Tabela 5</i> - Tabela de conversão 3E - Comprimento	3
<i>Tabela 6</i> - Tabela de conversão 3F - Volume	3
<i>Tabela 7</i> - Tabela de conversão 3G - Pressão	4
<i>Tabela 8A</i> - Dados comparativos dos principais medidores de vazão	13
<i>Tabela 8B</i> - Dados comparativos dos principais medidores de vazão	14
<i>Tabela 8C</i> - Dados comparativos dos principais medidores de vazão	15

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
BIBLIOTECA

83400/E338c(RCET)/019948

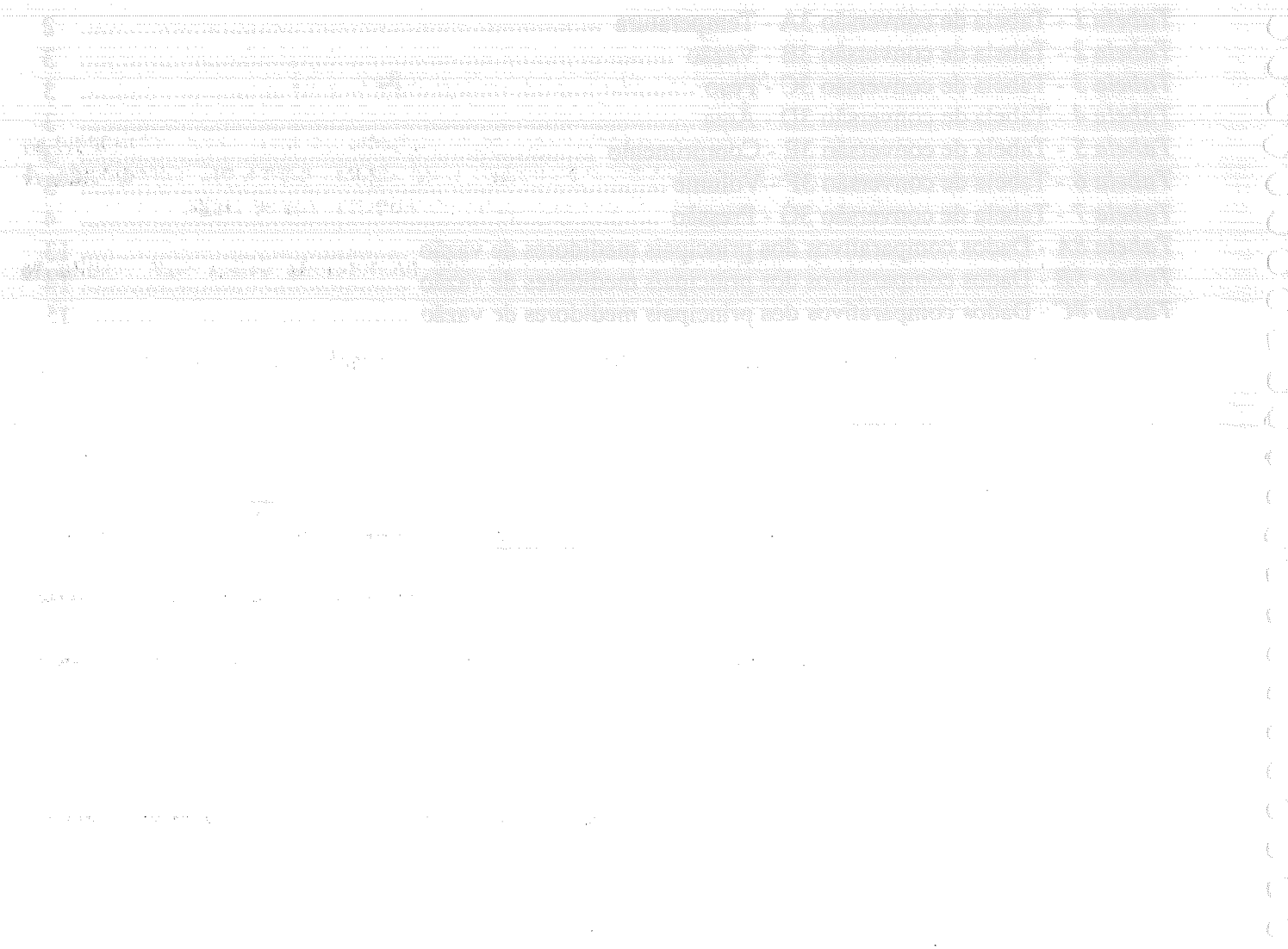
Calibracao e manutencao dos equipamentos d...

89521

- Figura 1 - Medida da pressão atmosférica
- Figura 2 - Comparação entre...
- Figura 3 - Placa de orifício
- Figura 4 - Equipamento de amostragem de flama
- Figura 5 - JA e B - Espectroscópio
- Figura 6 - Equipamento padrão para escanamento digital
- Figura 7 - Câmbio de medição - gás de escape
- Figura 8 - Tubo de Pírol original
- Figura 9 - Tubo de Pírol
- Figura 10 - Tubo de Pírol
- Figura 11 - Tubo de Pírol

01
02
03
04
05
06
07
08
09
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

SECRETARIA DE ESTADO DE SAÚDE



INTRODUÇÃO

O interesse pelo meio ambiente faz com que a CETESB se empenhe em resolver os problemas de poluição do ar, da água e dos resíduos sólidos.

Como sabemos o ar que respiramos é o meio vital imprescindível a todos os seres vivos.

Vamos então, discutir e estabelecer alguns parâmetros referente ao campo da **poluição do ar**.

Primeiramente destacaremos que a poluição do ar está dividida em (3) três campos distintos, os quais são:

Poluição Veicular: originada pelos automotivos;

Poluição Ambiental: procedente de várias fontes, ou a somatória destas: assim determina-se o índice de Poluição Ambiental, ou seja, a qualidade do ar que respiramos;

Poluição de Fontes Estacionárias: originárias de fontes industriais como chaminés e dutos.

Este último item é o campo de nosso interesse. Para avaliarmos o grau de poluição de uma fonte estacionária (chaminé ou duto); inicialmente teremos que efetuar uma amostragem a qual requer uma série de precauções tanto no campo operacional, bem como no teórico, porém, este assunto será mostrado com clareza no curso "amostragem em chaminés de fontes estacionárias".

Para se realizar uma amostragem em chaminé, devemos levar em conta diversos princípios fluido-dinâmicos e fisico-químicos.

O escopo destes é relativo à calibrações dos equipamentos utilizados para este fim.

Salientamos que, para utilizarmos qualquer equipamento, primeiramente devemos saber realmente se este está em condições de uso, ou proceder em conformidade com alguma norma pré-estabelecida. A esta afirmação denominamos calibração, que é vital a qualquer equipamento que se preze.

Denominamos de calibração ou aferição a um dispositivo que proporcione dados com resultados fidedignos exatos e precisos.

Outro aspecto é que para se calibrar deve existir um padrão, pois a calibração é uma comparação.

O que é um dispositivo padrão? (definição física)

Qual a diferença de um valor exato e de um preciso?

1

A calibração destes dispositivos deve ser exata e precisa, pois deles iremos coletar informações importantes para analisar e estudar os parâmetros ideais a serem aplicados, visando melhoria na eficiência dos EPCs (Equipamentos de Controle de Poluição), qual a taxa de emissão e concentração, dada como velocidade dos efluentes em termos de pressão diferencial, pressão estática e principalmente o seguimento dos fatores pré-estabelecidos.

Esperamos que esta pequena apostila sirva aos nossos propósitos.

OBJETIVO

A finalidade deste curso é fornecer de maneira didática como realizar calibrações dos dispositivos utilizados, na amostragem em chaminé, como "Tubos de Pitot", boquilhas, gasômetro úmido, seco e placa de orifício.

Todo o histórico é baseado na Norma CETESB de número E 16030. (Anexo I).

CONCEITOS BÁSICOS

Nesta apostila, temos algumas conversões úteis que serão necessárias aos cálculos a serem efetuados.

TABELAS DE CONVERSÃO

Unidade dada	Unidade desejada			
	$^{\circ} F$	$^{\circ} C$	$^{\circ} R$	K
$^{\circ} F$	-	$0,5555 \times (^{\circ} F - 32)$	$^{\circ} F + 460$	$0,5555 \times (^{\circ} F - 32) + 273$
$^{\circ} C$	$1,8^{\circ} C + 32$	-	$1,8^{\circ} C + 492$	$^{\circ} C + 273$
$^{\circ} R$	$^{\circ} R - 460$	$0,5555 \times (^{\circ} R - 492)$	-	$0,5555 \times (^{\circ} R - 492) + 273$
K	$1,8 (K - 273) + 32$	$K - 273$	$1,8 (K - 273) + 492$	-

EXERCÍCIOS

- A) Converta: $35^{\circ} C$ em $^{\circ} R$ e K .
 $273^{\circ} K$ em $^{\circ} F$ e $^{\circ} C$.
 $459,6^{\circ} F$ em $^{\circ} C$ e $^{\circ} R$.
- B) Transforme: 25 psi em in Hg e lb/ft^2 .
 $4,5 \text{ atm}$ em kgf/m^2 , psi e in Hg .

TABELA 2 - TABELA DE CONVERSÃO 3-B - VAZÃO

Unidade dada	Unidade desejada				
	$m^3/\text{segundo}$	m^3/hora	ft^3/minuto	$L/\text{segundo}$	cm^3/minuto
$m^3/\text{segundo}$	1	3.600	$21,1887 \times 10^2$	999,973	6×10^7
m^3/hora	$2,778 \times 10^{-5}$	1	0,5886	$27,777 \times 10^{-2}$	$1,666 \times 10^4$
ft^3/minuto	$4,7195 \times 10^{-4}$	1,699	1	$47,193 \times 10^{-2}$	2,8317
$L/\text{segundo}$	$1,000027 \times 10^{-3}$	3,6	2,11896	1	16,667
cm^3/minuto	$1,6667 \times 10^{-8}$	6×10^{-5}	$0,3531 \times 10^{-4}$	$5,9998 \times 10^{-2}$	1

TABELA 3 - TABELA DE CONVERSÃO 3-C - PESO

Unidade dada	Unidade desejada			
	Micrograma	Miligrama	Gramma	Libra
Micrograma	1	1×10^{-3}	1×10^{-6}	$2,2046 \times 10^{-9}$
Miligrama	1×10^3	1	1×10^{-3}	$2,2046 \times 10^{-3}$
Gramma	1×10^6	1×10^3	1	$2,2046 \times 10^{-3}$
Libras	$453,59 \times 10^6$	$453,39 \times 10^3$	453,59	1

TABELA 4 - TABELA DE CONVERSÃO 3-D - ÁREA

Unidade dada	Unidade desejada			
	Pol^2	$Pé^3$	cm^2	m^2
Pol^2	1	$6,9444 \times 10^{-3}$	6,452	$6,452 \times 10^{-4}$
$Pé^3$	144	1	929,0341	$929,0341 \times 10^{-4}$
cm^2	$15,5 \times 10^{-2}$	$10,764 \times 10^{-4}$	1	$1,0 \times 10^{-4}$
m^2	$15,5 \times 10^2$	10,764	$1,0 \times 10^4$	1

TABELA 5 - TABELA DE CONVERSÃO 3-E - COMPRIMENTO

Unidade dada	Unidade desejada					
	Pol	Pé	Micron	mm	cm	m
Pol	1	$83,33 \times 10^{-3}$	$2,54 \times 10^4$	25,4	2,54	$2,54 \times 10^{-2}$
Pé	12	1	$30,48 \times 10^4$	304,8	30,48	$30,48 \times 10^{-2}$
Micron	$3,937 \times 10^{-5}$	$32,308 \times 10^{-7}$	1	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1×10^{-6}
mm	$3,937 \times 10^{-2}$	$32,808 \times 10^{-4}$	1×10^3	1	0,1	1×10^{-3}
cm	$3,937 \times 10^{-1}$	$32,808 \times 10^{-3}$	1×10^4	10	1	1×10^{-2}
m	39,37	$32,808 \times 10^{-1}$	1×10^6	1×10^3	1×10^2	1

TABELA 6 - TABELA DE CONVERSÃO 3-F - VOLUME

Unidade dada	Unidade desejada			
	$Pé^3$	Pol^3	m^3	l
$Pé^3$	1	1728	$2,8317 \times 10^{-2}$	28,316
Pol^3	$5,78704 \times 10^{-4}$	1	$1,63872 \times 10^{-5}$	$1,63868 \times 10^{-2}$
m^3	35,3144	$6,1023 \times 10^4$	1	999,973
l	$3,5316 \times 10^{-2}$	61,025	$1,000027 \times 10^{-3}$	1

TABELA 7 - TABELA DE CONVERSÃO 3-G - PRESSÃO

Unidade dada	Unidade desejada						
	Pa	atm	bar	kgf/m ²	lbf/ft ²	Psi	in Hg
Pa	1	9,869 x 10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10,2 x 10 ⁻²	20,9 x 10 ⁻³	1,45 x 10 ⁻⁴	2,95 x 10 ⁻⁴
atm	101325,0	1	1,01325	10,332 x 10 ³	2116	14,6959	29,92
bar	10 ⁵	9,869 x 10 ⁻¹	1	10,197 x 10 ³	2088,5	14,5	29,53
kgf/m ²	9,80665	9,6784 x 10 ⁻⁵	9,8 x 10 ⁻⁵	1	20,5 x 10 ⁻²	14,2 x 10 ⁻⁴	28,9 x 10 ⁻⁴
lbf/ft ²	47,88	47,264 x 10 ⁻⁵	4,79 x 10 ⁻⁴	4,88	1	69,4 x 10 ⁻⁴	14,0 x 10 ⁻³
Psi	6894,8	6,80 x 10 ⁻²	68,95 x 10 ⁻³	703	144	1	2,04
in Hg	3386,5	3,34 x 10 ⁻²	33,9 x 10 ⁻³	345,3	70,73	49 x 10 ⁻²	1

PRESSÃO DO GÁS

DEFINIÇÃO DE PRESSÃO

Um corpo deve estar sujeito a três espécies de força: cisalhamento, compressão e tensão. Fluidos são incapazes de contrariar uma força elástica; conseqüentemente eles estão sujeitos somente ao cisalhamento e compressão.

Uma unidade de força compressiva em um fluido é denominada de pressão, o que designa uma força por unidade de área (ex: Lbf/in² ou psi).

Pressão é igual em todas as direções em um ponto dentro de um volume fluidométrico e age perpendicularmente para a superfície.

PRESSÃO BAROMÉTRICA

Pressão barométrica e pressão atmosférica são sinônimos. Estas pressões são medidas com um barômetro e são expressas normalmente em polegadas ou milímetros de mercúrio.

Pressão barométrica padrão é a média da pressão atmosférica ao nível do mar com latitude 45° norte a 35°F (1,7°C), equivalente a uma pressão de 14,698 Lbf/in² (1,05 kg/cm²), exercido na base de uma coluna de mercúrio de 29,921 polegadas de altura (75,999 cm).

O tempo e a altitude são responsáveis pela variação da pressão barométrica.

PRESSÃO GAGE

Medidas de pressão Gage são usualmente indicadas pela diferença de pressão abaixo ou acima da pressão atmosférica adjacente ao Gage.

Geralmente a pressão Gage é indicada por ela mesma, ou seja, a real. Se a pressão de um sistema é maior do que a pressão predominante dentro da atmosfera, a Gage é expressa por um valor positivo, porém se é menor, a pressão Gage é negativa, também chamada de vácuo.

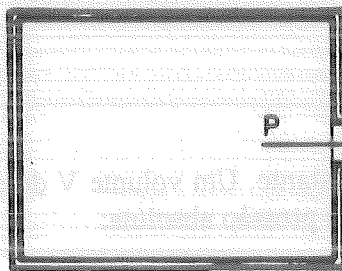
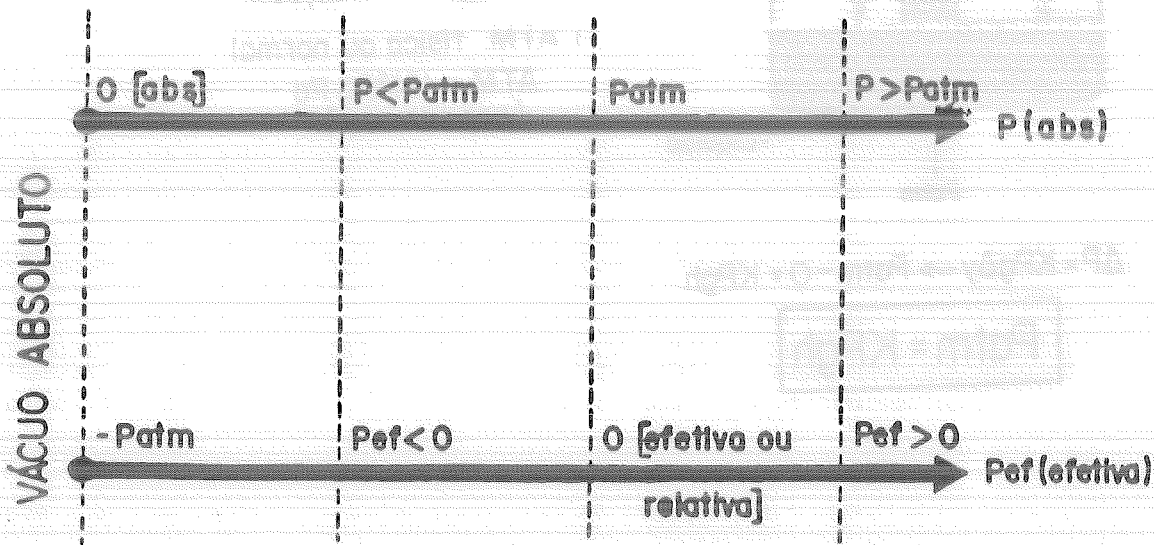
PRESSÃO ABSOLUTA.

A pressão Gage (a qual poderá ser positiva ou negativa) atua de forma relativa efetiva e predominante na pressão atmosférica vigente (e que quase sempre é positiva), acrescentando-lhe algebricamente e, produzindo um valor que é uma condição estabelecida de "Pressão Zero Absoluta".

A expressão matemática é:

$$P_{abs} = P_{atm} + P_g$$

REPRESENTAÇÃO SEGUNDO UM EIXO.



P = pressão absoluta do gás

P_{atm} = pressão atmosférica

P_{ef} = pressão efetiva

$$P_{ef} = P - P_{atm}$$

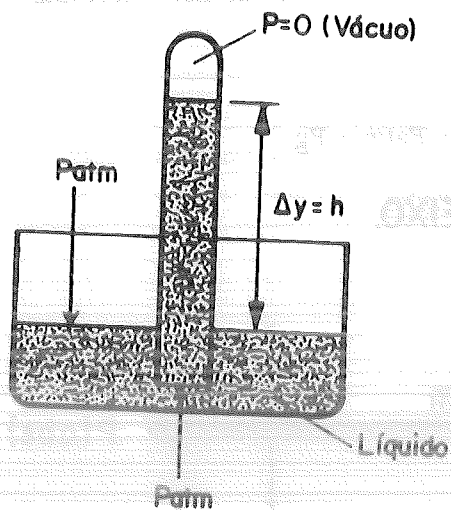
Se $P > P_{atm} \rightarrow P_{ef} > 0$ ou $P_{ef} = P_m$ (pressão manométrica)

Se $P < P_{atm} \rightarrow P_{ef} < 0$ ou $P_{ef} = P_v$ (pressão de vácuo)

de modo geral:

$$P = P_{atm} \pm P_{ef}$$

MEDIDA DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA - EXPERIÊNCIA DE TORRICELLI



Notas:

· A experiência é realizada com mercúrio

· Ao nível do mar tem-se:

$$P/\text{Hg} \rightarrow h = 0,76\text{m}$$

$$P/\text{H}_2\text{O} \rightarrow h = 10,33\text{m}$$

· 1 ATM. física ou normal

$$\text{ATM.} = 101325 \text{ Pa}$$

(por convenção)

$$\Delta P = K P g \Delta y \rightarrow P_{atm} - 0 = K P g h$$

$$P_{atm} = K P g h$$

LEIS DE UM GÁS IDEAL

LEI DE BOYLE E CHARLES

A condição desta lei se faz quando a temperatura T é mantida constante. Um volume V de certa massa de um gás perfeito com uma dada composição varia inversamente à pressão absoluta:

$$V \propto \frac{1}{P} \text{ a } T \text{ cte}$$

onde α = fator de proporcionalidade.

LEI DE CHARLES

A condição desta lei é que, quando o V é mantido constante a pressão absoluta de alguma dada massa de um gás perfeito com uma certa composição varia diretamente à temperatura absoluta.

$$P \propto T \text{ a } V \text{ cte}$$

LEI DE UM GÁS IDEAL

Ambas as leis de Boyle e Charles satisfazem a seguinte equação:

$$V P = \frac{mRT}{M}$$

As unidades para o R (constante dos gases) dependem das unidades usadas nas equações:

A) 1544 $\frac{(\text{LbF}) (\text{ft})}{(\text{Lbm} - \text{mole}) (^\circ\text{R})}$

B) 21,83 $\frac{(\text{inHg}) (\text{ft}^3)}{(\text{Lbm} - \text{mole}) (^\circ\text{R})}$

C) 554,6 $\frac{(\text{mmHg}) (\text{ft}^3)}{(\text{Lbm} - \text{mole}) (^\circ\text{R})}$

Para:

$$V = \text{ft}^3$$

$$m = \text{Lbm}$$

$$M = \text{Lbm/Lbm} - \text{mole}$$

$$T = ^\circ\text{R}$$

$$P = \text{LbF/ft}^2 \quad \text{para (a)}$$

$$= \text{in Hg} \quad \text{para (b)}$$

$$= \text{mmHg} \quad \text{para (c)}$$

Qualquer valor de R pode ser obtido pela utilização de um fator de conversão adequado para 22,414 litros por $\text{gm}_m - \text{mole}$ ou 359 ft^3 por um Lbm mole a 32°F e 29,92 in Hg.

NÚMERO DE REYNOLDS

DEFINIÇÃO

Uma típica força inercial por unidades de volume de um fluido é $P \cdot V/g_c L$; e uma típica força viscosa por unidade de volume de um fluido é $\mu V/g_c L$; a primeira expressão dividida pela segunda proporciona uma razão adimensional, conhecida por Número de Reynolds.

$$N_{re} = \frac{L v P}{\mu} = \frac{\text{força inercial}}{\text{força viscosa}}$$

μ = viscosidade de um fluido

L = dimensão linear de um sistema

G_c = constante adimensional

v = velocidade do fluido

P = densidade do fluido (massa/volume)

Um Nre grande é o menor efeito da força de viscosidade; para Nre pequeno é o maior efeito da força de viscosidade.

FLUIDO LAMINAR E TURBULENTO

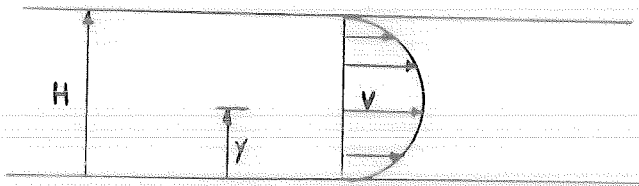
- a) No fluxo laminar, o fluido é compelido a um deslocamento de camadas (ou laminar) pela ação da viscosidade.

As camadas do fluido deslocam-se sob formas paralelas do resíduo aparente à outra; qualquer agitação é somente de natureza molecular.

Em dutos circulares o fluxo laminar ocorre quando o Nre é menor do que 2000 e menor do que 0,1 para um arranjo de partículas de um fluido comum.

- b) No fluxo turbulento, o fluido não é limitado pelas formas paralelas, mas desloca-se, e desenvolve-se casualmente. Jamais, o fluxo turbulento ocorre quando o Nre para dutos circulares é maior do que 2500 e maior do que 1000 para um arranjo de partículas.

- a.1) Entre Pratos Paralelos sem um fluxo laminar.



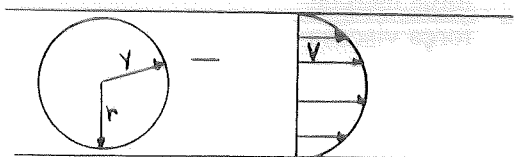
A equação geral expressando a variação da velocidade sobre a seção x é:

$$V_y = (V_{\text{centro}}) (H_y - Y^2)$$

onde a velocidade média é dada por:

$$V = \left(\frac{2}{3}\right) v_{\text{centro}}$$

- a.2) Através de um duto circular.



A velocidade para um fluxo laminar, através de um duto circular na seção x, aproxima-se de uma parábola, e a equação geral da variação da velocidade sobre a seção x é:

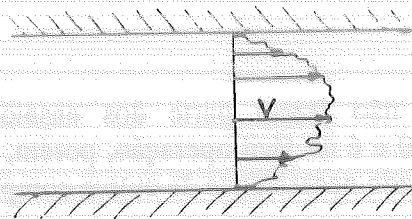
$$V_y = (v_{\text{centro}}) \left(1 - \frac{Y^2}{r^2} \right)$$

onde r = raio do duto

Velocidade média é dada por:

$$V = \left(\frac{1}{2} \right) v_{\text{centro}}$$

b.1)



Velocidade axial em um duto circular, com um fluxo turbulento é 20% maior do que a velocidade média da seção x.

A velocidade média no ponto é a distância de 1/6 do diâmetro da parede do duto.

O QUE É UM FLUIDO ?

DINÂMICA é o estudo do movimento de uma matéria dividida em duas partes - dinâmica para corpos rígidos e dinâmica para corpos não rígidos.

Os últimos subdividem-se em duas partes elásticas: corpos sólidos elásticos e mecânica dos fluidos.

Os fluidos, em termos simples, são substâncias que não resistem a força de cisalhamento ou forças sem movimento. Assim como um sólido, os fluidos são comumente divididos em líquidos e gasosos, sendo que os líquidos possuem forças intermoleculares.

FLUIDO COMPRESSÍVEL E INCOMPRESSÍVEL

Costuma-se dividir os fluidos em dois grupos: gases e líquidos.

Os gases são compressíveis, e sua densidade muda facilmente diante da temperatura e pressão; os líquidos, por outro lado, são certamente difíceis de comprimir e em alguns casos deve-se desconsiderar sua incompressibilidade.

MEDIDORES DE VOLUME, VAZÃO E VELOCIDADES, CALIBRAÇÕES EM GERAL

Os equipamentos utilizados nas amostragens em chaminé possuem vários componentes a ser calibrados, lembrando que, os fatores de calibração seguem a Norma E16.030 da CETESB (em anexo nesta apostila).

Os componentes que deverão ser calibrados são:

- Gasômetro seco - medidor de volume
- Placa de orifício - medidor de vazão
- Gasômetro úmido - medidor de volume
- Tubo de Pitot - medidor de Pressão (ΔP , Pestática)
- Boquilha
- Termômetro

NOTA

As calibrações de boquilha e termômetro não fazem parte dos ensaios práticos, porque seu procedimento está descrito na Norma E 16030 e é de fácil operação, porém, os demais equipamentos cumprirão o objetivo deste curso, mesmo havendo necessidade de outros complementares.

Justificamos que, uma calibração completa é morosa, pois o tempo disponível é insuficiente e o número de alunos numeroso. Tendo em vista os problemas citados, abreviaremos algumas etapas do curso, para que todos tenham um aproveitamento satisfatório.

ESCLARECIMENTOS

Um componente padrão é aquele que independe de outra medida ou de outro equipamento; ele foi simplesmente calculado, este é o caso do calibrador do gasômetro úmido.

O "Espirômetro" é um equipamento denominado de Padrão Primário e o similar que utilizaremos é o "Dispositivo Padrão por Escoamento Líquido".

Ele foi projetado e construído com a finalidade de calibrar dispositivos como o gasômetro úmido.

Por sua vez, o gasômetro úmido em fase de Padrão Intermediário é utilizado para calibrar um gasômetro seco, também considerado de Padrão Secundário.

No caso dos tubos de Pitot, o padrão deste dispositivo, também chamado de "Tubo de Pitot Padrão", possui dimensões bem estabelecidas e serve como padrão para os Tubos de Pitot do tipo "S", "Cobra" e "Alnor".

O porquê do nome de Pitot Padrão? Devido seu " C_p ", ou seja coeficiente de fricção, ser exatamente 0,99.

Porém, este aparato não é suficiente. Há a necessidade de se confinar o fluxo de ensaio, e para isto o Laboratório de Tecnologia de Ar - NPPE da CETESB dispõe de um sistema de velometria que simula todas as velocidades usuais de qualquer sistema de ventilação industrial.

Este sistema tem a capacidade de impor velocidades de 2m/s até 50 m/s ou seja 7 km/h até 170 km/h.

Tais recursos possuem um painel de monitoramento do sistema, onde podemos verificar as pressões, ΔP , pressões estáticas e velocidades.

Finalmente, com relação a placa de orifício encontrada no interior do equipamento do amostrador de chaminé, verificamos que este dispositivo limita a vazão imposta ao equipamento. Para efetuar uma coleta de material particulado, procedemos outras com " Isocinética", a qual determina se a velocidade do efluente gasoso (interior da chaminé ou duto) é "igual" à velocidade da boquilha. Desta forma, o monitoramento é feito no manômetro do amostrador, pois o diferencial de pressão age em função da placa de orifício que esclarece qual a vazão correspondente a ser utilizada para que esta condição ocorra.

A sua calibração é feita em conjunto com o gasômetro seco, de maneira que, quando impomos (ou simulamos) uma certa quantidade de volume verificamos a sua performance.

Os demais detalhes de cálculos constarão no item posterior.

CALIBRAÇÃO, CÁLCULOS E DEFINIÇÕES

No transcorrer deste curso, haverá uma série de cálculos e equações; deduzí-los pormenorizadamente seria cansativo e, sobretudo fugiria à finalidade proposta, entretanto algumas definições foram registradas sinteticamente, para que as equações aqui sejam devidamente assimiladas.

Vamos então às deduções. Quanto às dúvidas, o orientador as esclarecerá.

Como sabemos, a vazão e a velocidade numa seção transversal de um duto, por onde se dá o escoamento de um fluido de gás, relacionam-se através da equação da continuidade:

$$\rho \cdot Q \cdot U \cdot A = V_F \cdot A_F \quad (\text{Equação 1})$$

de forma simplificada:

$$Q = A \cdot V_m \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

$$V_M = \frac{M_F}{\rho_f}; \quad M_F = \rho_f \int_A U dA$$

Desta forma, a determinação de um implica no conhecimento do outro; os principais instrumentos para medida de volume, velocidade e vazão são abordados a seguir.

GENERALIDADES SOBRE MEDIDORES DE VAZÃO

Os medidores de vazão podem ser classificados em grupos, que se baseiam em princípios de funcionamento semelhantes.

A Tabela A resume os dados mais significativos sobre os principais instrumentos usados para medir esta importante variável, na indústria, em laboratório ou em aplicações específicas (uso doméstico, agricultura, etc).

Esta Tabela não é exaustiva quanto à enumeração dos princípios de medição de vazão, mas fornece dados sucintos sobre os medidores.

As características principais dos instrumentos são, assim, facilmente comparáveis.

Pode-se observar que existe uma diversificação muito grande de realizações de instrumentos destinados a medir fluxo ou quantidade de fluido. Os fluidos medidos podem ser líquidos ou gasosos, às vezes viscosos, abrasivos, corrosivos ou carregados de impurezas.

As pressões e temperaturas podem corresponder a condições criogênicas ou às de vapores superaquecidos.

O conjunto de medição é, normalmente, formado de duas partes: elemento primário e elemento secundário.

O elemento primário encontra-se em contato com o fluido, resultando em alguma forma de interação.

Sua função é transformar a vazão em outra grandeza física facilmente mensurável. Assim, uma placa de orifício transforma a vazão em pressão diferencial, um sensor ultrassônico em frequência elétrica, etc. Os elementos secundários, por sua vez, transformam a grandeza obtida do elemento primário em informação adequada para leitura local ou transmissão à distância do valor correspondente à vazão.

Os termos de precisão e largura de faixa empregados na Tabela A, devem ser entendidos da forma que expressamos a seguir.

Precisão (Accuracy) de medição pode ser expressa em porcentagem da escala inteira, ou em porcentagem do valor instantâneo.

Ela representa a tolerância de erro de medição para um determinado medidor, quando expressa em porcentagem da escala a precisão é absoluta. Exemplo: uma escala de 0 a 200 m³/h com precisão de $\pm 1\%$ de fundos de escala (f. e.), significa que a tolerância de erro é de 2 m³/h em qualquer ponto dela.

Quando é expressa em porcentagem do valor instantâneo a precisão é relativa.

Exemplo: a mesma escala de 0 a 200 m³/h com precisão de $\pm 1\%$ do valor instantâneo (v.i.) significa que, quando o ponteiro indica 50 m³/h, a tolerância é $\pm 1\%$ de 50 m³/h, ou seja $\pm 0,5$ m³/h. A precisão de $\pm 1\%$ V.i. é obviamente melhor que a precisão de $\pm 1\%$ F. e..

Somente quando o ponteiro indica o valor máximo da escala a tolerância de erro é a mesma, segundo ambos os critérios.

A Figura 2 ilustra a comparação entre precisão F.e. e V.i..

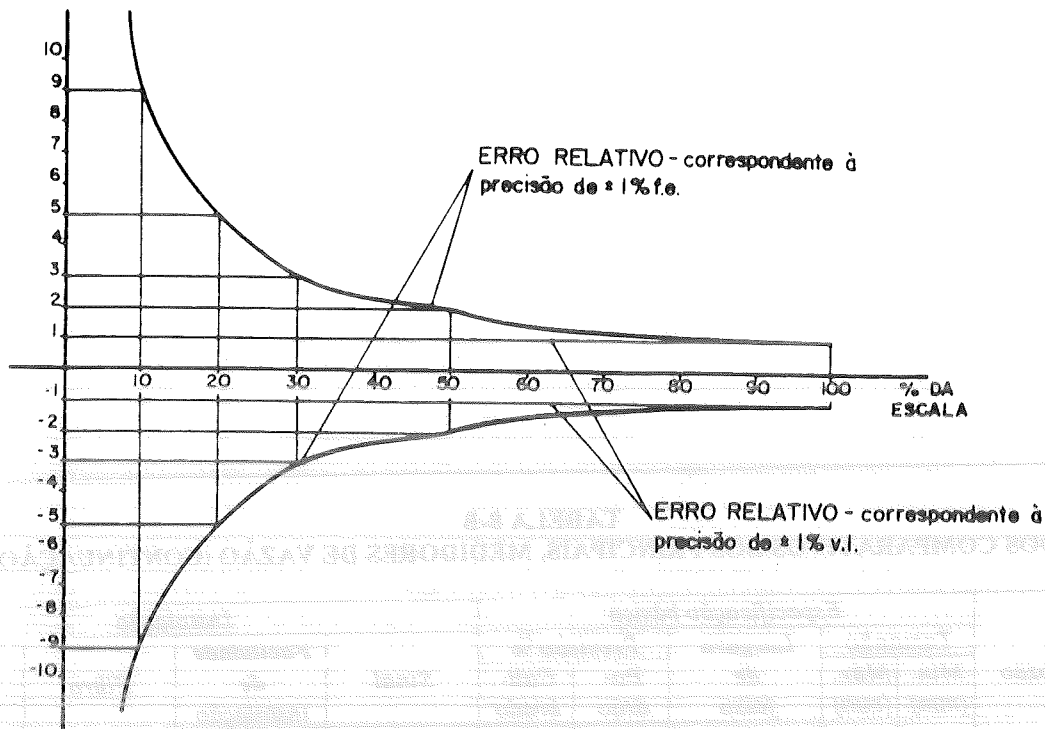


Figura 2 - Comparação entre precisão F. e. e V. i.

A precisão indica os erros de conformidade, histerese e repetitividade. Conformidade (Conformity): é o desvio percentual máximo que permite uma determinada característica de se afastar de sua curva original. Histerese (hysteresis) é o desvio percentual máximo com o qual, para uma mesma vazão, uma indicação do valor instantâneo se afasta do outro independente de ter sido alcançado a partir de valores maiores ou menores.

Repetitividade (repeatability): é o desvio percentual máximo que indica uma mesma medição e reproduz, as demais condições de medida igualmente.

TABELA 8-A - DADOS COMPARATIVOS DOS PRINCIPAIS MEDIDORES DE VAZÃO

Tipo de medidor de vazão	Propriedades do fluido a ser medido							
	Liq. Limp.	Liq. Visco	Liq. Sujo	Gases/Vapor	Liq. Corros.	Temp. Altas	Temp. Criogên.	Lim. Mín. do nº Re.
Elementos deprimogênicos								
Placas de orifício concêntrico *								
Flange taps	*		X	*	*	*	0	> 8.000
Corner taps	*			*	*	*	0	> 5.000
Radios taps	*		X	*	*	*	0	> 8.000
Pipe taps	*		X	*	*	*	0	> 14.000
Placas de orifício excêntrico *	0		X	*	*	*		> 10.000
Placas de orifício entr. cônica *	*	*		0	*	*	0	25
Tubos de Venturi								
Clássico fundido	*		X	0	0	0		> 40.000
Clássico usinado	*		X	*	0	0	0	> 50.000
Clássico soldado	*		X	*	0	0		> 40.000
Em dutos retangulares	0		0	*		0		> 200.000
Tubos de Pitot *	*			*	*	0		1.500

Legendas:

* = Recomendado

0 = Aplicável

X = Aplicável quando a condição adversa é moderada e usando acessórios adequados.

TABELA 8-B
DADOS COMPARATIVOS DOS PRINCIPAIS, MEDIDORES DE VAZÃO (CONTINUAÇÃO)

Tipo de medidor de vazão	Especificação básica					Instalação			
	Tamanho		Largura de faixa	Precisão %		Sinal	Facilidade de instalação	Filtro	Trecho reto
	Min. (mm)	Máx. (mm)		Pa- drão	Cali- brado				
1- Elementos deprimogênicos									
• Placas de orifício concêntrico									
Flanges Taps	50	760	3,5:1	± 1,5	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
Corner Taps	50	1000	3,5:1	± 1,5	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
Radius Taps	50	760	3,5:1	± 1,4	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
Pipe Taps	50	300	3,5:1	± 1,7	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
• Placas de orifício excêntrico	100	350	3,5:1	± 2,1	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
Placas de orifício entr. cônica	25		3,5:1	± 2,2	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
• Tubos Venturi									
Clássico fundido	100	800	3,5:1	± 1,7	± 0,75		Razoável	Não	Neces.
Clássico usinado	50	250	3,5:1	± 1,7	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
Clássico soldado	200	1200	3,5:1	± 1,7	± 0,75		Fácil	Não	Neces.
Dutos retangulares	-	-	3,5:1	± 5,0	± 1,00		Fácil	Não	Neces.
• Tubos de Pitot	200	Qual- quer	3,5:1	± 1,5	± 0,75		Mérito total	Não	Neces.

LEGENDA

Sinal de pressão diferencial que poderá ser usado para leitura direta numa coluna ou transformado em analógico ou pulsos através de transmissor adequado.

TABELA 8-C - DADOS COMPARATIVOS DOS PRINCIPAIS MEDIDORES DE VAZÃO (CONTINUAÇÃO)

Tipo de medidor de vazão	Considerações econômicas			Principais Vantagens	Principais Inconvenientes
	Manutenção	Preço relativo	Perda de carga		
1-Elementos deprimogêneos	Verificação			Facilidades de fabricação - existência de dados para larga faixa de aplicação.	Baixa largura de faixa, necessidade de elemento secundário, necessidade de longos trechos retos.
• Placas de orifício concêntrico					
Flanges Taps	Periódica	Barato	Média		
Corner Taps	Periódica	Barato	Média		
Radius Taps	Periódica	Barato	Média		
Pipe Taps	Periódica	Barato	Média		
• Placas de orifício excêntrico	Periódica	Barato	Média		
• Placas de orifício entr. cônica	Periódica	Barato	Média	Largamente aceitos.	
• Tubos de Venturi	Verificação Periódica	Médio +	Baixa		
Clássico fundido	Verificação Periódica	Médio +	Baixa	Baixa perda de carga, aplicação a fluidos erosivos.	Custos de fabricação elevados.
Clássico usinado	Verificação Periódica	Médio +	Baixa		
Clássico soldado	Verificação Periódica	Médio +	Baixa		
Dutos retangulares	Verificação Periódica	Médio +	Baixa		
• Tubos de Pitot	Verificação Periódica	Médio +	Muito baixa		

ORIFÍCIO

FATOR DE CORREÇÃO

O princípio de funcionamento da placa de orifício consiste em introduzir uma restrição localizada na tubulação, onde a medição deve ser feita. Esta restrição, no caso, é provocada por um orifício feito em uma placa de pouca espessura e adequadamente colocada no tubo de maneira a obrigar o fluxo a mudar de velocidade e, conseqüentemente, provocar um diferencial de pressões, que, devidamente medido e interpretado, é representativo da vazão.

A equação de Bernoulli generalizada a uma corrente fluida mostra que as variações de velocidades correspondem a variações de pressões. A inserção de uma placa de orifício numa linha provoca variações bruscas na seção de passagem, assim como variações correspondentes de velocidade e pressão.

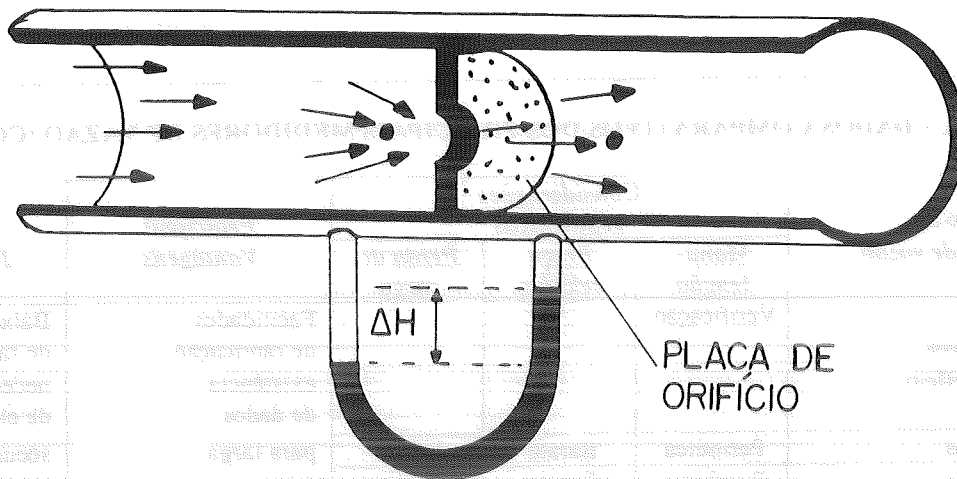


Figura 3 - Placa de orifício

No nosso caso, o orifício em questão (Figura 4) está localizado no interior de um equipamento de amostragem em chaminé, com a incumbência de limitar e corresponder à vazão pretendida do mesmo, ou seja, relacionando de forma que a vazão seja condizente à razão da isocinética já pré-estabelecida.

Vamos então, sumariamente, demonstrar a origem do coeficiente do fator de correção da referida placa de orifício, denominado de $\Delta H@$.

Este fator possui uma faixa (citado na Norma CETESB nº E 16030, no Anexo I).

A utilização da diferença de pressão estática, provocada por constrições do fluxo, tem sido comum para possibilitar a determinação de vazões.

A equação particular de fluxo para um orifício pode ser reduzida a:

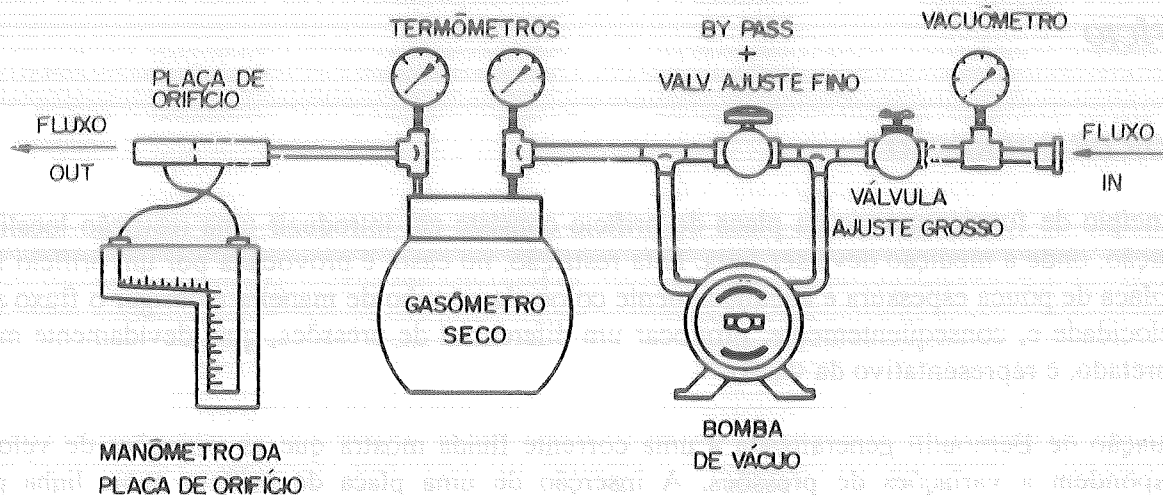


Figura 4 - Equipamento de amostragem de chaminé

$$G = CY \sqrt{\frac{P_1 P}{T_1}} \quad (\text{Equação 3})$$

$$Q_1 = CY \sqrt{\frac{T_1 P}{P_1}} \quad (\text{Equação 4})$$

onde:

G = vazão de fluxo de massa

Q_1 = vazão de fluxo de volume

C = coeficiente de proporcionalidade; (N_{Re})

Y = fator de expansão (300 ft/sec) ou (548 m/min)

P_1 = pressão absoluta antes do orifício

P = diferencial de pressão entre os 2 lados do orifício

T_1 = temperatura absoluta antes do orifício

C = f (Nre) coeficiente de descarga pelo fato de tratar-se de um fluido real.

Os limites críticos dos orifícios são determinados através dos seguintes parâmetros:

$$G = C_1 \frac{P_1}{T_1}; \quad Q_1 = C_1 T_1$$

onde:

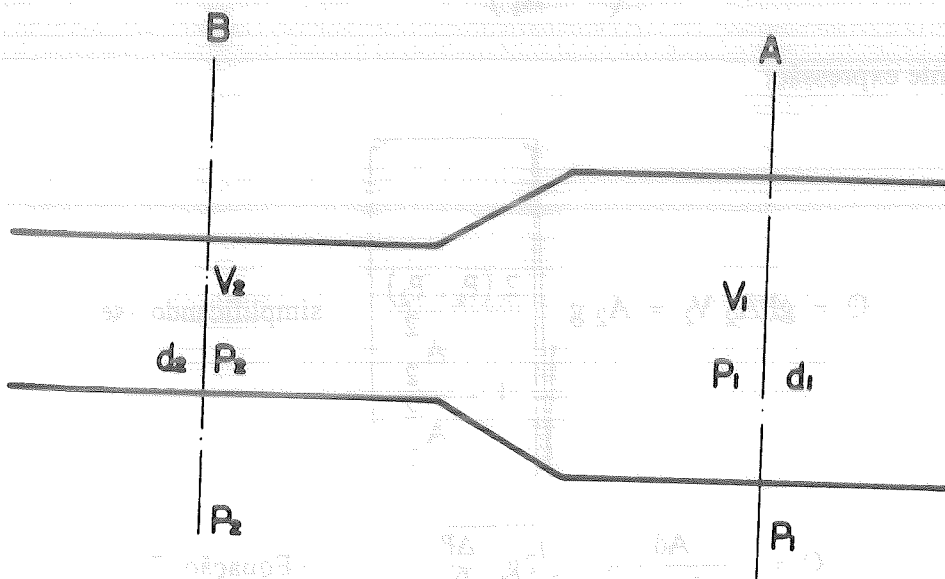
$$P_2 \leq 0,53 P_1$$

$$C_1 = \frac{C_1 R}{M}; \quad R = \text{cte dos gases} = 21,83 \frac{\text{inHg ft}^3}{\text{Lbmol}^\circ\text{R}}$$

Legenda:

1.: antes do orifício

2.: depois do orifício



A medida em que o fluxo passa da seção A para seção B, temos uma redução de área.

Supondo-se inexistência de atrito e aplicando-se o teorema de Bernoulli entre as seções A e B:

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \int_{P_2}^{P_1} \frac{dp}{\rho} \quad (\text{Equação 5})$$

assumindo-se um gás incompressível e um processo adiabático, a redução de área deverá ser compensada por um aumento de velocidade,

$$d m_f = \rho U dA$$

$$m_f = \int \rho U dA$$

$$m_f = \rho \int_A U dA$$

$$\frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{P_1 - P_2}{\rho}$$

Temos, então, pelo princípio, a seguinte equação expressa em peso por unidade de tempo:

$$P \cdot g \cdot A_1 \cdot V_1 = P \cdot g \cdot A_2 \cdot V_2 \quad \text{ou} \quad V_1 = \frac{A_2}{A_1} \times V_2$$

Substituindo:

$$V_2^2 = \frac{Q (P_1 - P_2)}{P \left(1 - \frac{A_2}{A_1} \right)} \quad (\text{Equação 6})$$

Conduz à seguinte expressão:

$$Q = g P A_2 V_2 = A_2 g \sqrt{\frac{2 (P_1 - P_2)}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} \quad \text{simplificando -se:}$$

$$Q = \frac{A_d}{1 - \left(\frac{A_\mu}{A_F} \right)^2} \cdot \sqrt{2 g_c \frac{\Delta P}{\rho_F}} \quad (\text{Equação 7})$$

onde: $g_c = 32,17 \text{ ft/sec}^2$ ou $9,81 \text{ m/s}^2$

UNESP - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

NOTA

Quando o gás é considerado compressível pode se desenvolver uma relação que corrige a vazão:

$$Q = A_2 g \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{1 - \frac{A_2^2}{A_1^2}}} \times K_1 \times K_2$$

K_1 = Coeficiente de compressibilidade

K_2 = Coeficiente de fluxo

$$K_1 = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \cdot \frac{Y}{(Y-1)} \cdot \frac{1}{(1-\phi)} \left[(1-\phi) \cdot \frac{Y-1}{Y} \right] \phi^{2/Y}}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2 \phi^{2/Y}}}$$

e

$$K_2 = \frac{C}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

onde:

C = coeficiente de descarga (trata-se de um fluido real)

$$\phi = \frac{P_2}{P_1}$$

Y = relação entre o calor específico do fluido à pressão cte e o volume cte.

Tendo em vista que o bocal para a tomada de velocidade possui um diâmetro inferior ao diâmetro do orifício e a tomada de pressão é colocada depois desta, a relação pode ser descrita:

$$Q = C' v C_c A_2 \cdot \frac{\sqrt{2g \frac{P_1 - P_2}{W}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad (\text{Equação 8})$$

onde:

W = gás nas condições do orifício

C_c = coeficiente de contração (0,61 - 0,72)

C_v' = coeficiente de velocidade (0,95 - 0,99), que em geral expressa-se através do coeficiente.

$$K = \frac{C_c C_v'}{1 - \left(\frac{A_2}{A}\right)^2} = \frac{C}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}$$

onde:

C = coeficiente de descarga $\approx 0,6$

K = é função do N° de Reynolds e da relação d_2/d_1 , variando entre 0,59 e 0,64.

d_2 = diâmetro do furo da placa de orifício

d_1 = diâmetro do duto externo, desta forma:

$$Q = K A_2 2g \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{W}}$$

portanto, para uma calibração:

$$Q = K_m \sqrt{\frac{\Delta H}{P}}$$

K_m = determinado por calibração experimental coeficiente de fluxo total ou global.

$$Q_{cal} = K_m \sqrt{\frac{\Delta H \cdot T_{mcal}}{P_{mcal} \cdot M_{cal}}}$$

onde:

$T_{M cal} = 68^\circ F$

$T_{M cal} = 29,82 \text{ " Hg}$

$M_{cal} = 28,95$

$Q_{cal} = 0,75$

assim:

$$\frac{Q}{Q_{cal}} = \frac{K_m \sqrt{\frac{\Delta H T_M}{P_M M}}}{K_m \sqrt{\frac{\Delta H_{cal} T_{cal}}{P_{Mcal} M_{cal}}}}; \text{ ordenando-se}$$

$$Q = Q_o \sqrt{\frac{\Delta H}{\Delta H_{cal}} \cdot \frac{T_M}{T_{mcal}} \cdot \frac{P_{mcal}}{P_M} \cdot \frac{M_{cal}}{M}}$$

Simplificando-se, temos:

$$K_m = Q \sqrt{\frac{T_M \Delta H}{P_M H}} \quad \text{daí:} \quad \Delta H@ = \frac{0,9244}{K_m^2}$$

onde :

T_M = temperatura média de entrada e saída ($^{\circ}R$)

P_M = pressão atmosférica ("Hg)

M = peso molecular = 29

$\Delta H@$ = fator de correção da placa de orifício.

0,9244 = cte em relação a 0,75 ft³/min de ar seco a 68 $^{\circ}F$ e 29,92" Hg (21,237 L/min) (20 $^{\circ}C$) (1,033 Kg/cm² ou 1 atm física)

Simplificando e usando-a na folha de calibração (Anexo 2)

temos:

$$\Delta H@ = \left(\frac{K H}{P_{atm} T_m} \right) \cdot \left(\frac{T_w \theta}{V_m} \right)^2 [\text{"H}_2\text{O}] \quad (\text{Equação 9})$$

onde :

$K = 0,0317$ para unidades inglesas, ou $0,0012$ para unidades métricas

$\Delta H@$ = pol. de H₂O (vazão) (lida no manômetro do equipamento, geralmente líquido amarelo ou vermelho)

P_{atm} = pol. de Hg

T_w e T_m = temperaturas ($^{\circ}R$)

V_w = volume do Wet test Meter ou Gasômetro úmido em (ft³)

ÍNDICE:

W = Gasômetro úmido

m = gasômetro seco

$\Delta H@$ = fator de correção da placa orifício.

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DA PLACA DE ORIFÍCIO

Todo o procedimento está descrito na Norma já citada, porém, vamos sumariamente dar mais algumas explicações.

Nesta calibração, faz-se passar um volume de ar conhecido, durante um intervalo de tempo (ϕ), através de um medidor intermediário (gasômetro úmido), acoplado em série a um medidor de orifício.

Após a passagem do ar, anota-se o volume registrado no medidor (gasômetro seco) e a perda de pressão verificada no manômetro.

Estas leituras são acompanhadas pelas tomadas das temperaturas em cada uma das condições de variação de volume e da perda de pressão no orifício.

A calibração consiste em se determinar a perda de carga no orifício, $H@$, nas seguintes condições específicas:

$T = 21^{\circ}\text{C}$

$P = 760 \text{ mm Hg}$

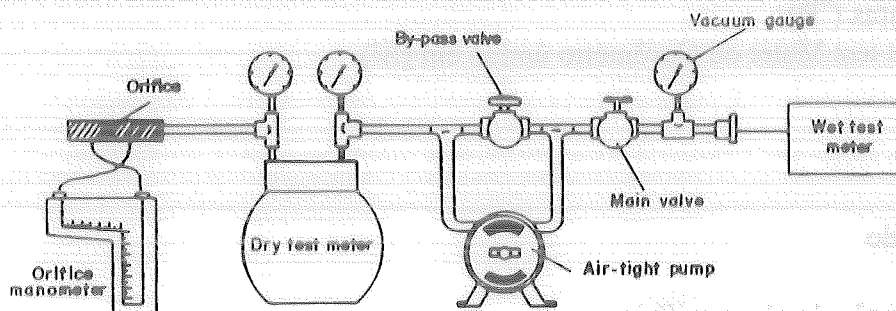
Vazão de 21,24 L/min.

A equação que rege o fator de calibração do orifício segue:

$$\Delta H@ = \frac{0,0011 \cdot \Delta H}{P_b (t_s + 273)} \cdot \left[\frac{(t_u + 273) \cdot \theta^2}{V_u} \right] [\text{mm H}_2\text{O}]$$

Em outras palavras, a calibração se faz na mesma faixa usada em campo, porque no equipamento de amostragem em chaminé, quando se está operando, há muita perda de carga, pela impregnação de material particulado no filtro e na condensação dos gases nos borbulhadores. Isto faz com que a vazão do equipamento diminua. Na calibração, nós simulamos esta somatória de perdas de cargas e avaliamos a performance da placa de orifício. (Tolerância de calibração usada pela CETESB, conforme a Norma CETESB E 16030.)

$$\Delta H@ = 36,576 \text{ mm H}_2\text{O a } 56,896 \text{ mm H}_2\text{O}.$$



GENERALIDADES SOBRE MEDIDORES DE VOLUME

Os medidores de volume ou gasômetros podem ser vistos no item 4. Vamos agora abordar o item referente aos gasômetros.

Primeiramente, discutiremos um dispositivo padrão, também chamado de Espirômetro.

Este equipamento é um instrumento de deslocamento positivo, consistindo em um cilindro de volume

conhecido, fechado em uma extremidade e tendo a outra submersa em um tanque de água.

O cilindro pode ser aberto ou fechado à atmosfera, através de uma válvula. Durante a calibração de outro instrumento, transfere-se o ar do cilindro do espirômetro para o instrumento, sendo que, o ar retirado, é substituído por água à medida que o cilindro submerge.

Estabelecido o tempo do deslocamento vertical do cilindro, determina-se o volume do fluxo que passa através do instrumento a ser calibrado.

Durante o procedimento, deve-se atentar para alguns requisitos:

- Deve haver equilíbrio térmico entre a água e o ar;
- O sistema deve estar perfeitamente nivelado;
- Para evitar a influência do atrito, deve-se fazer a leitura inicial e final, juntamente com a saída de água do espirômetro em movimento;
- O uso do espirômetro é sugerido para calibração de padrões secundários de baixa resistência e baixa vazão.

A seguir, as Figuras 5, 5A e 6 ilustram o dispositivo citado.

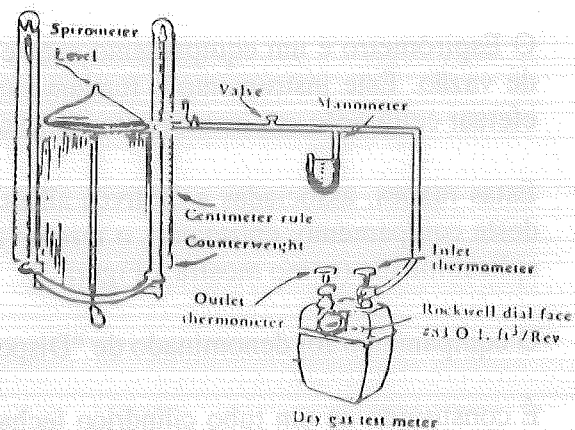


Figura 5

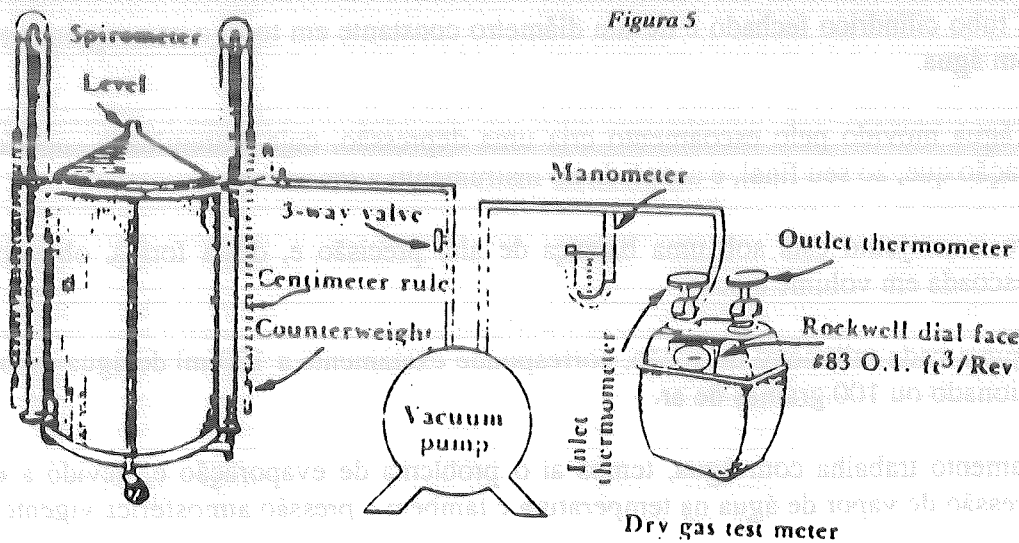


Figura 5 A - Espirômetro

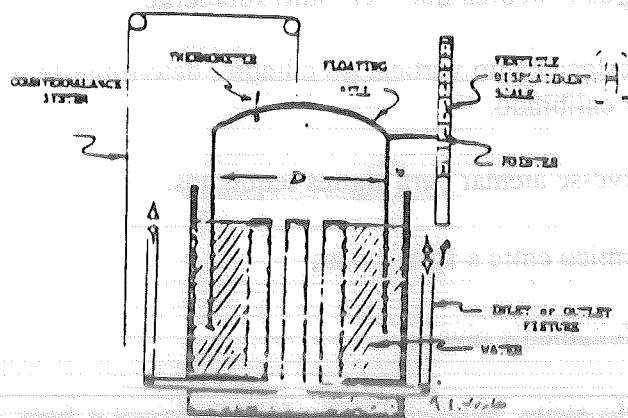


Figura 6 - Espirômetro

O Espirômetro é um equipamento caro e de difícil transporte por sua dimensão elevada e exígua faixa de vazão. Este instrumento é fundamentalmente usado em laboratório como "Padrão Primário" para efetuar calibração em instrumentos considerados medidores de volume ou de gasômetro úmido e seco.

Estas razões, associadas a motivos alheios à vontade desta Companhia, determinaram a não aquisição deste equipamento; entretanto, o mesmo foi substituído por um outro aparato de igual princípio físico e aplicabilidade (como mostra a Figura 7).

O equipamento foi denominado de "Dispositivo Padrão por Escoamento Líquido".

É constituído de um tubo cilíndrico fechado e de um diâmetro constante em todo o seu seguimento, o qual é preenchido com água.

O deslocamento de água movido pelo escoamento cria uma depressão, cuja extremidade superior é ligada por uma tubulação que, ao seu final, é acoplada ao instrumento a ser calibrado.

Lembramos que todo o conjunto está sob uma balança de alta precisão e, desta forma, obtemos a quantidade de água escoada em volume e peso.

O princípio físico é que a cada milímetro de seção, corresponde exatamente a 100 ml de água escoada ou 100 ml de ar succionado ou 100 gramas de ar.

Como todo o equipamento trabalha com água, temos aí o problema de evaporação e, devido a este fator, corrigimos a pressão de vapor de água na temperatura e também a pressão atmosférica vigente.

Segue abaixo a Figura 7:

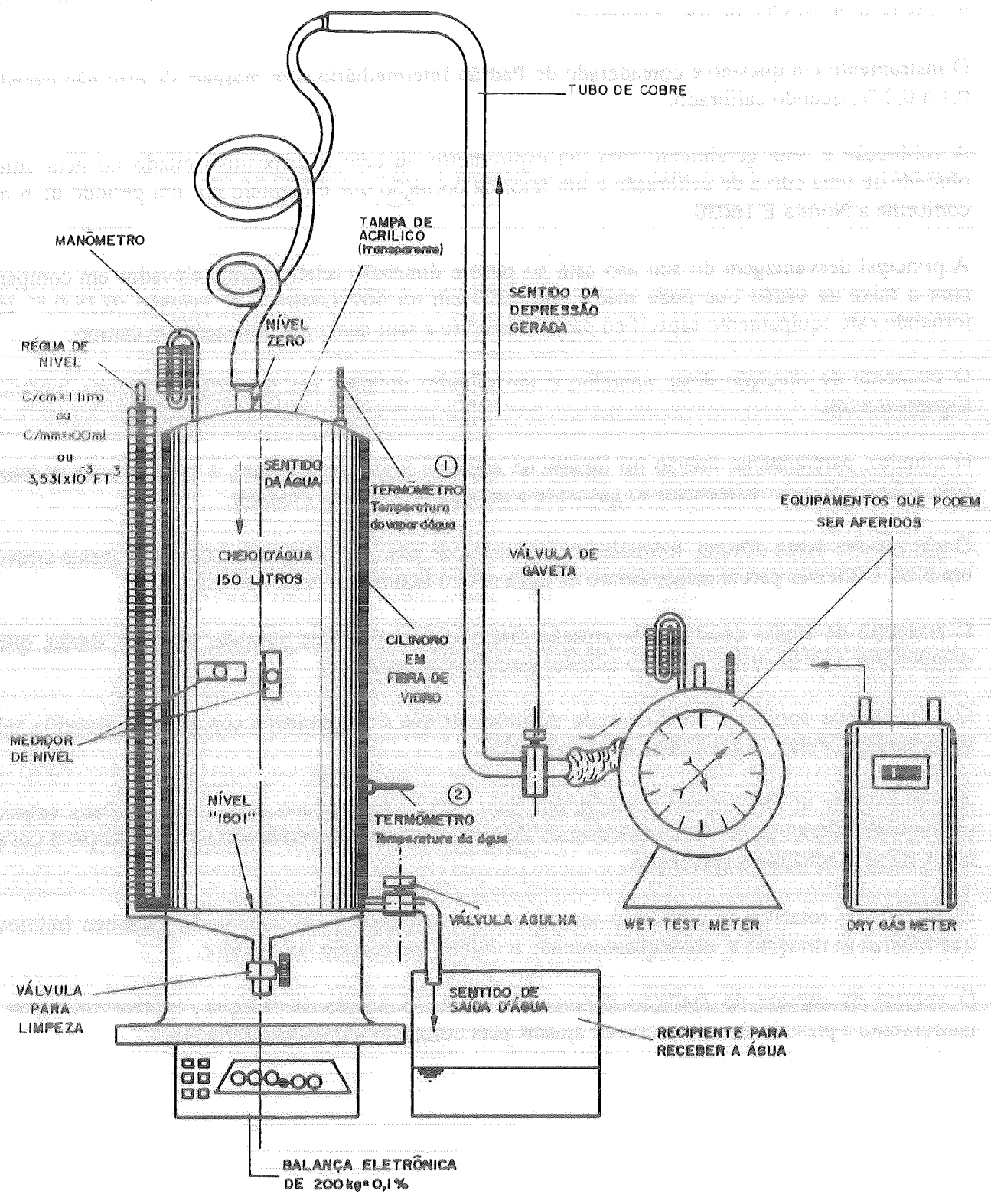


Figura 7 - Dispositivo padrão por escoamento líquido

GASÔMETRO ÚMIDO OU WET TEST METER.

Este medidor indica o volume do fluido gasoso que passa através dele. Para determinar a vazão, necessita-se do auxílio de um cronômetro.

O instrumento em questão é considerado de Padrão Intermediário com margem de erro não excedendo 0,1 a 0,2 %, quando calibrado.

A calibração é feita geralmente com um espirômetro ou com o dispositivo citado no item anterior, obtendo-se uma curva de calibração e um fator de correção que é mantido por um período de 6 meses conforme a Norma E 16030.

A principal desvantagem do seu uso está no peso e dimensão relativamente elevados em comparação com a faixa de vazão que pode medir (até 1200 cfm ou 502 L/min) e de pressão (0,25-0,5" H₂O), tornando este equipamento específico para laboratório e sem nenhuma utilização em campo.

O elemento de medição deste aparelho é um cilindro dividido em partições, conforme mostram as Figuras 8 e 8A.

O cilindro, parcialmente imerso no líquido de selagem (água geralmente), é colocado em movimento pela ação da pressão diferencial do gás entre a entrada e a saída do medidor.

O gás penetra numa câmara, formada por uma série de pás invertidas, montadas radialmente através de um eixo, e imersas parcialmente dentro da água com o líquido, ao centro do cilindro.

O conjunto de forças criadas pela pressão diferencial na divisória permite, pela sua forma, que um componente atue de modo a girar o cilindro (movimento horário).

O gás continua confinado na câmara de medição até que a extremidade esquerda da divisória saia da água, quando, então, o gás é liberado para a saída.

A continuidade do movimento é assegurada pelo fato de que, pouco antes da experiência anterior, a extremidade direita da divisória penetrou no líquido, iniciando uma nova câmara de medição e um novo ciclo, ou seja, uma nova revolução.

O movimento rotativo do cilindro é acoplado mecanicamente a um sistema de ponteiros (relojoaria), que totaliza as rotações e, conseqüentemente, o volume percorrido no medidor.

O volume da câmara de medição depende do nível do líquido de selagem, motivo pelo qual este instrumento é provido de um visor e de ajustes para colocá-lo num plano horizontal.

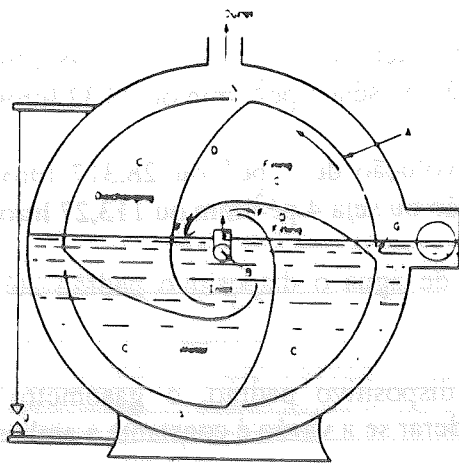


Figura 8 - Cilindro de medição

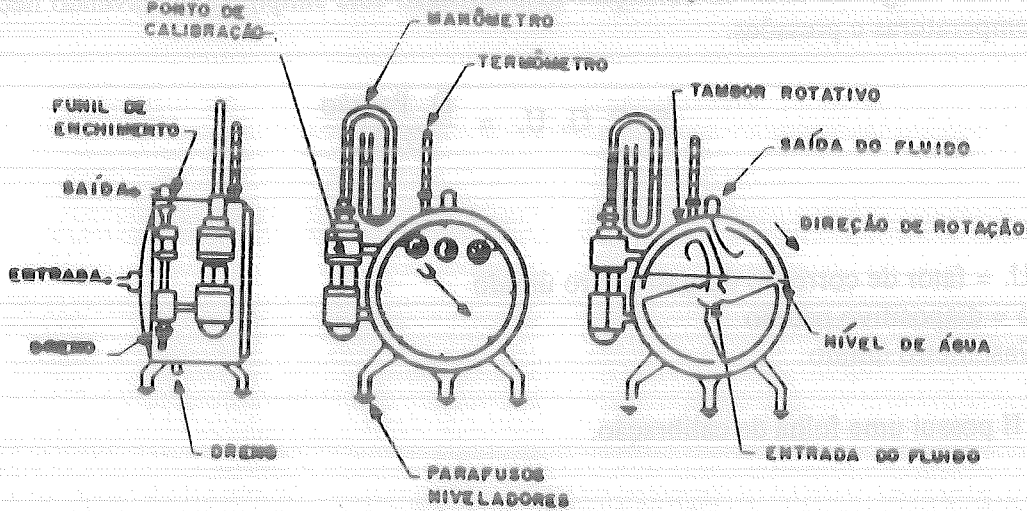


Figura 8A - Gasômetro úmido

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO ÚMIDO.

Para procedermos à calibração do gasômetro úmido, devemos tomar uma série de precauções:

- colocar o aparelho devidamente nivelado;
- verificar o nível de água;
- calibrá-lo em ambiente com temperatura constante;
- verificar se há água no manômetro;
- testá-lo para averiguar se não há vazamentos de ar e água.

Após ter checado todos os requisitos acima citados, acoplá-lo ao dispositivo padrão (Espirômetro ou Dispositivo Padrão por Escoamento Líquido), e colocá-lo em funcionamento, com atenção em anotar o máximo de revoluções por minuto permitido pelo aparelho. A seguir:

- Gasômetro Úmido com 1 revolução de 0,25 pé³ ou 7,08 litros permite fornecer no máximo 4 revoluções por minuto de vazão ou seja 1 pé³/min ou 28,32 litros/min.
- Gasômetro Úmido com 1 revolução de 1 pé³ ou 28,317 litros permite fornecer, no máximo, 4 revoluções por minuto de vazão ou seja 4 pé³/min ou 113,27 litros/min.

Feita a acoplagem, enche-se de água o dispositivo padrão até a marca zero, juntamente com o ponteiro do gasômetro úmido.

Ao abrirmos a válvula do dispositivo padrão, o gasômetro úmido registra o volume de ar succionado. Importante considerar se a vazão é constante a ambos dispositivos.

Obtivemos o final e o inicial do volume e peso da quantidade de água e ar, assim como a quantidade de revoluções impressas no gasômetro úmido, as quais fixamos em 4, anotando as temperaturas e pressões obtidas. Temos então: o volume detido no gasômetro úmido correlacionado com o volume apresentado no dispositivo padrão (feito através de uma expressão teórica, significa uma medição absoluta), onde surge um fator de correção. Esta equação está simplificada, havendo necessidade de corrigir temperaturas e pressões.

$$F. C. G. U. = \frac{D. Padrão}{G. U.}$$

Onde:

F. C. G. U. = fator de correção do gasômetro úmido

D. Padrão = dispositivo padrão

G. U. = Gasômetro úmido

O Anexo II possui uma folha de calibração.

GASÔMETRO SECO

Os gasômetros secos utilizam-se do mesmo princípio do gasômetro úmido. Por prescindirem de água, seu desempenho é menos acurado.

Têm maior aproveitamento nos trabalhos de campo e por serem bem mais leves e rústicos, ficam imunes aos problemas de congelamento e de evaporação da água, porque seu funcionamento é a seco.

Estes gasômetros, também chamados de "medidores de foles", são constituídos por um conjunto de câmara de medição de volume variável, e ligados mecanicamente, a um conjunto de válvulas de distribuição, que controlam a direção do gás que irá encher e esvaziar as câmaras de partições flexíveis.

O conjunto de válvulas faz penetrar o gás sucessivamente nas câmaras, conforme a Figura 9, de tal modo que sua parte rígida fica submetida à pressão diferencial entre a entrada e a saída do medidor.

Assim sendo, a câmara se deforma e seu movimento, acoplado ao sistema de movimentação das válvulas, modifica a distribuição.

Quando uma câmara está cheia, outra câmara de medição, esvaziada num ciclo anterior, é aberta.

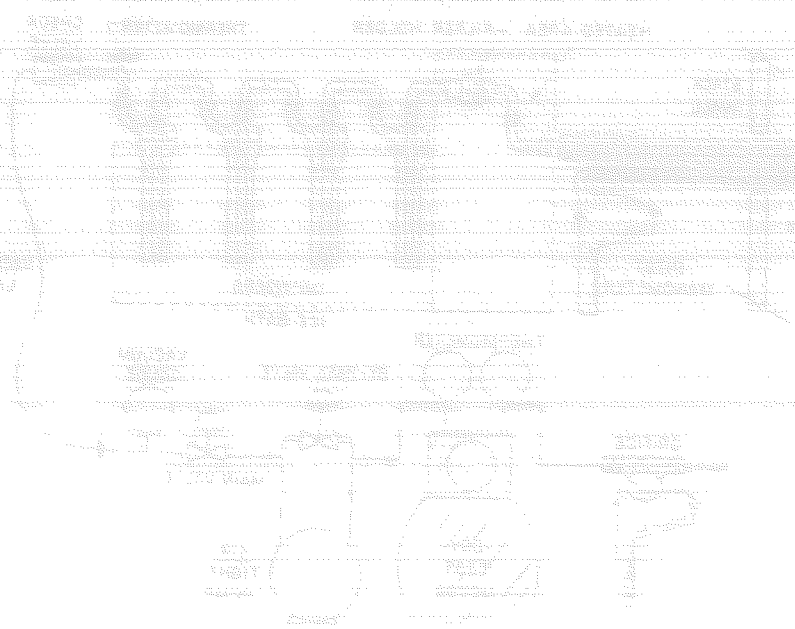
Devemos ressaltar que os gasômetros secos nacionais, não possuem a mesma performance dos importados.

A diferença é que os nacionais não possuem um dispositivo que permite ajustar a elasticidade dos foles, ou seja, poder diminuir ou aumentar a quantidade de volume de ar; em contrapartida, os mesmos detêm um funcionamento satisfatório para vazões até 10l/min., em sistema de depressão, porém, acima desta faixa, seu rendimento fica muito além do permitido segundo a Norma da CETESB E16.030.

CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO SECO

Como foi dito no item metodologia de calibração da Placa de Orifício, simulamos a perda de carga para averiguar a performance do gasômetro. O Anexo I contém a folha de calibração.

A Figura 9 ilustra um esquema da calibração por um determinado período de tempo, promove-se a passagem de um volume de ar conhecido através do gasômetro úmido, utilizado como medidor intermediário, o qual está calibrado por um medidor padrão (Dispositivo Padrão por Escoamento Líquido ou Espirômetro); finalmente, este é acoplado em série ao gasômetro seco.



Abaixo, segue Figura 9:

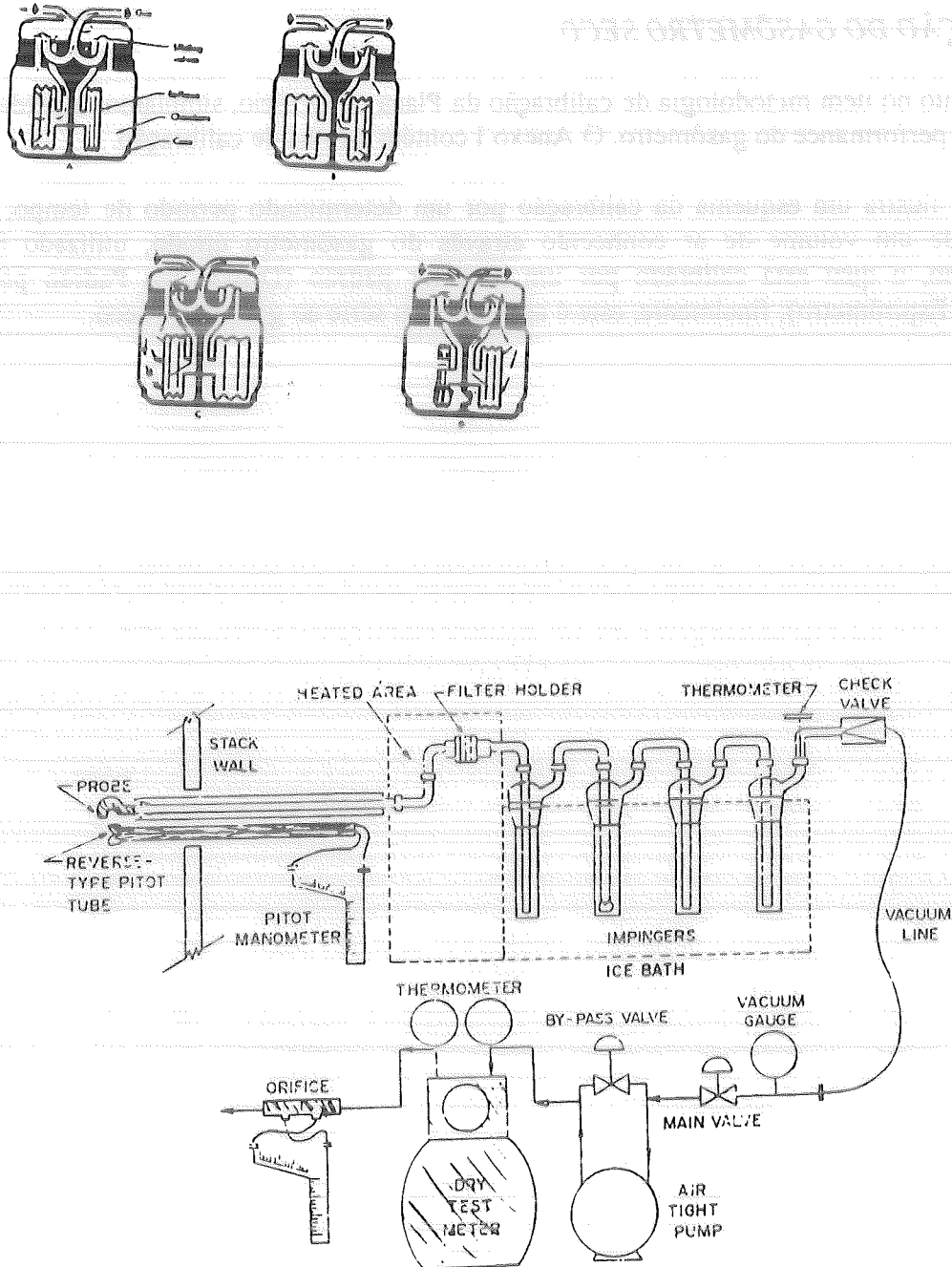


Figura 9 - Esquema de calibração do gasômetro seco

A leitura do volume é executada para mais de uma vazão previamente escolhida e controlada através da pressão manométrica.

Às leituras volumétricas registradas, respectivamente, nos gasômetros seco e úmido, anota-se também as pressões e as temperaturas.

Com este conjunto de dados podemos determinar o fator de correção do gasômetro seco regido por esta equação:

\overline{FCM} ou Y_i

$$Y_i = \frac{V_u P_b (t_s + 273)}{V_s P_b + \frac{\Delta H}{13,6} (t_u + 273)} \quad (\text{Equação 10})$$

onde:

V_u = volume do gasômetro úmido

P_b = pressão barométrica

t_u, t_s = média da temperatura da entrada e saída

V_s = volume do gasômetro seco

H = pressão no sistema em pol. H_2O

O limite de tolerância usada pela CETESB segundo Norma é:

$$0,9600 < Y_i < 1,0400$$

TUBOS DE PITOT

GENERALIDADES E ESCLARECIMENTOS

Um dispositivo utilizado freqüentemente nas medições da qualidade do ar, como também para verificar os parâmetros de projetos referentes aos sistemas de ventilação é o "Tubo de Pitot".

O que é um tubo de Pitot? Vamos então esclarecer e pormenorizar este assunto, muitas vezes confuso para alguns autores.

A experiência do Henri Pitot, em 1932, propôs o primeiro instrumento para medir velocidades de líquidos. Nesta época, o tubo de Pitot era bem rudimentar. Compunha-se de um de vidro curvado em ângulo reto, cujo ramal vertical era mantido fora da água, enquanto o ramal horizontal, provido de um bocal em forma de funil, era colocado dentro da corrente de água, como mostra a Figura nº 10. Tubo de Pitot original para medir velocidades de rios.

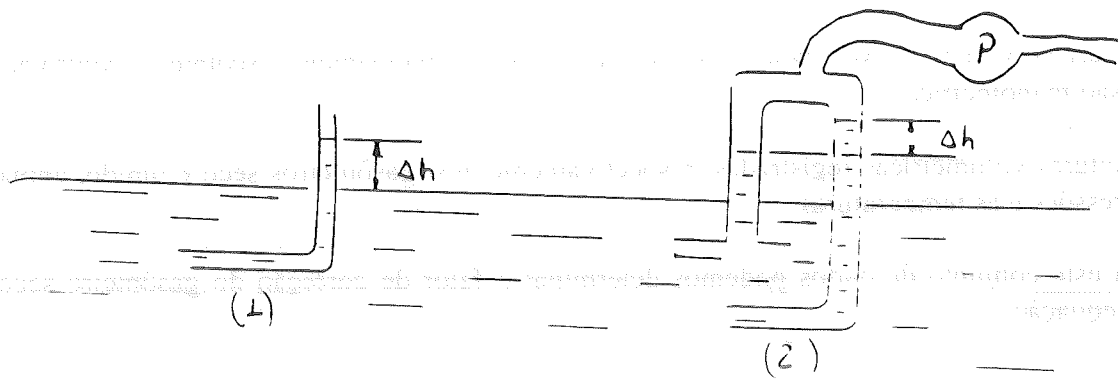
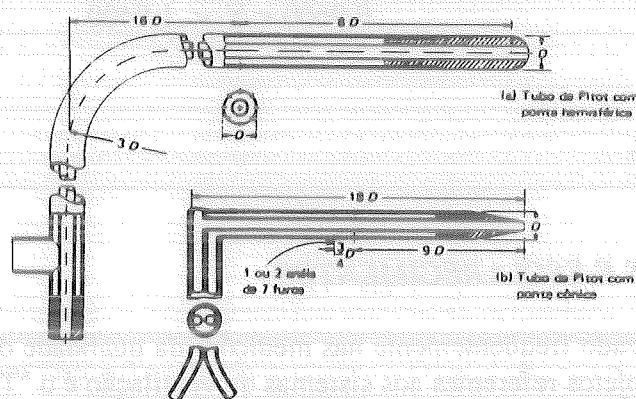


Figura 10 - Tubo de Pitot original

No caso (1), a pressão diferencial ΔH é a medida entre o nível do rio e do vidro. No caso (2), um tubo de referência ajuda a execução da leitura. A pera P serve para diminuir a pressão em ambos os ramos do tubo em "U" invertido, elevando o nível dos mesmos.

Aperfeiçoou-se muito o aparelho originalmente idealizado, usando-se a medição de corrente de líquidos ou de gases em tubos fechados e pressurizados.

O aparelho derivado do Tubo de Pitot, que tem suas tomadas de pressão total e estática combinadas num só instrumento, chama-se também tubo de Prandtl (Figura nº 11).



Tubo de Prandtl ou de Pitot duplo

Figura 11 - Tubo de Prandtl

Entretanto, costuma-se chamar "Tubo de Pitot" a todo sistema de medição de velocidade local derivado do sistema original do ilustre físico.

O tubo de Prandtl, ou tubo de Pitot duplo, ou ainda Pitot estático, é um aparelho constituído por dois tubos coaxiais formando uma Figura em L.

A extremidade do tubo interno, colocada face à corrente, capta a pressão total, enquanto a pressão estática é sentida através dos pequenos orifícios da parede do tubo externo (ou seja, perpendicular ao sentido do fluxo), distantes da ponta do tubo.

A pressão diferencial resultante (pressão total P_1 , menos pressão estática P_E) é chamada de dinâmica.

Suas expressões em função da velocidade da corrente fluida e da densidade do fluido são os seguintes:

a) Para fluidos incompressíveis:

$$(P_1 - P_e) = \frac{\rho \cdot V^2}{2} \quad \text{ou ainda}$$

$$V_1 = \frac{\sqrt{2(P_1 - P_e)}}{\rho} \quad \text{(Equação 11)}$$

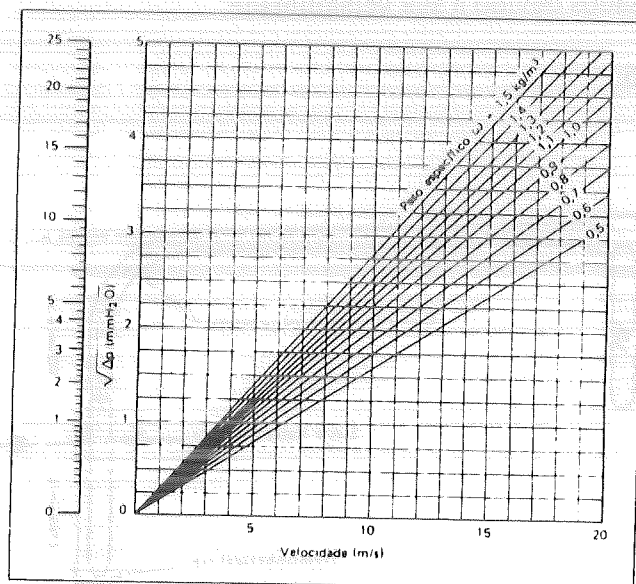
b) Para fluidos compressíveis:

$$V_1 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot P_1 \left[\left(\frac{P_E}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad \text{(Equação 12)}$$

Nota: Para velocidades inferiores a 15 m/s ao nível do mar a equação 11 pode ser usada ao invés da equação 12.

A Figura 12 permite avaliar rapidamente a velocidade do fluido em função da pressão diferencial e do peso específico.

Segue abaixo Figura 12: Velocidade em função de $\sqrt{\Delta P}$ e P



Velocidade em função de $\sqrt{\Delta P}$ e ρ

Figura 12 - Velocidade em função de $\sqrt{\Delta P}$ e P

As seguintes equações permitem o uso de unidades usuais:

a) Para fluidos incompressíveis:

$$V_1 = \sqrt{2 g \frac{\Delta P}{S_1}} \quad \text{ou} \quad V_1 = 4,4287 \sqrt{\frac{\Delta P}{S_1}} \quad (\text{Equação 13})$$

b) Para fluidos compressíveis :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2 k}{k - 1} \cdot \frac{10^4 P_1}{S_1} \cdot \left[\left(\frac{10^4 P_1 - P}{10^4 P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (\text{Equação 14})$$

onde:

$P_1 = \text{em kgf/cm}^2$

$\Delta P = \text{em mm H}_2\text{O a } 4^\circ\text{C}$

$S_1 = \text{em kgf/m}^3$

$V_1 = \text{em m/s}$

No caso dos tubos de Pitot com ponta cônica, hemisférica ou elíptica, não é necessário aplicar qualquer coeficiente de correção às fórmulas simples acima.

Existem vários tipos de tubos de Pitot utilizados nos sistemas de ventilação.

Vamos enfatizar somente 3 tipos, pois são estes os mais utilizados pela CETESB.

Como foi dito, para utilizar qualquer equipamento deve-se ter um equipamento Padrão (Standard), chamado de "Tubo de Pitot Padrão" (Figura 13); outro tipo de Pitot é o chamado de "Tubo de Pitot "S" (STAUSSSCHEIBE), como mostra a Figura 14 e, por último o "Tubo de Pitot Cobra" (Figura 15). Estes Pitot são comumente usados devido a sua versatilidade.

Segue abaixo: Figuras 14 a 16:

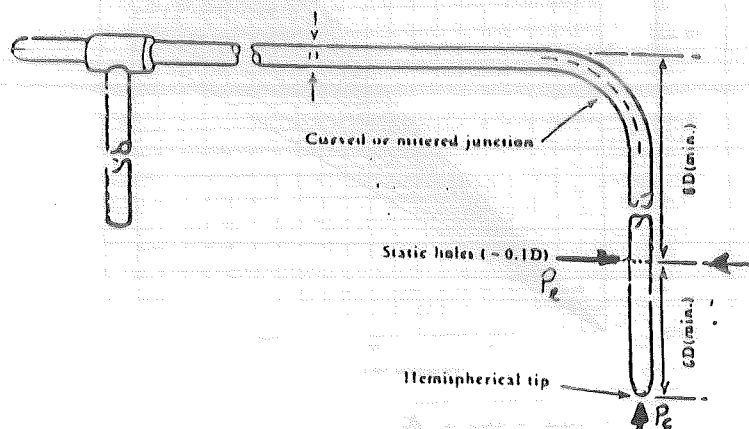


Figura 13 - Tubo de Pitot "padrão"

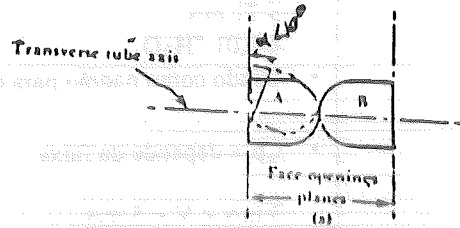
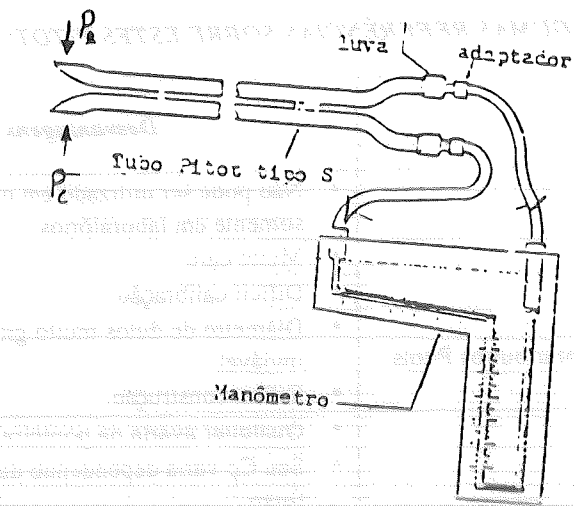
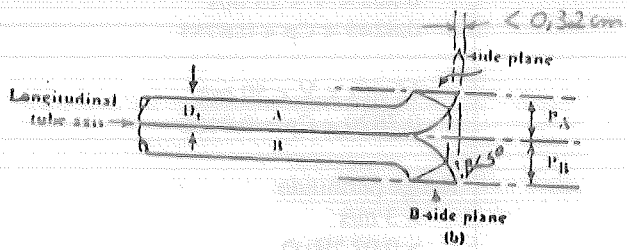


Figura 14 -
Tubo de Pitot "S"



Detalhes do Pitot's

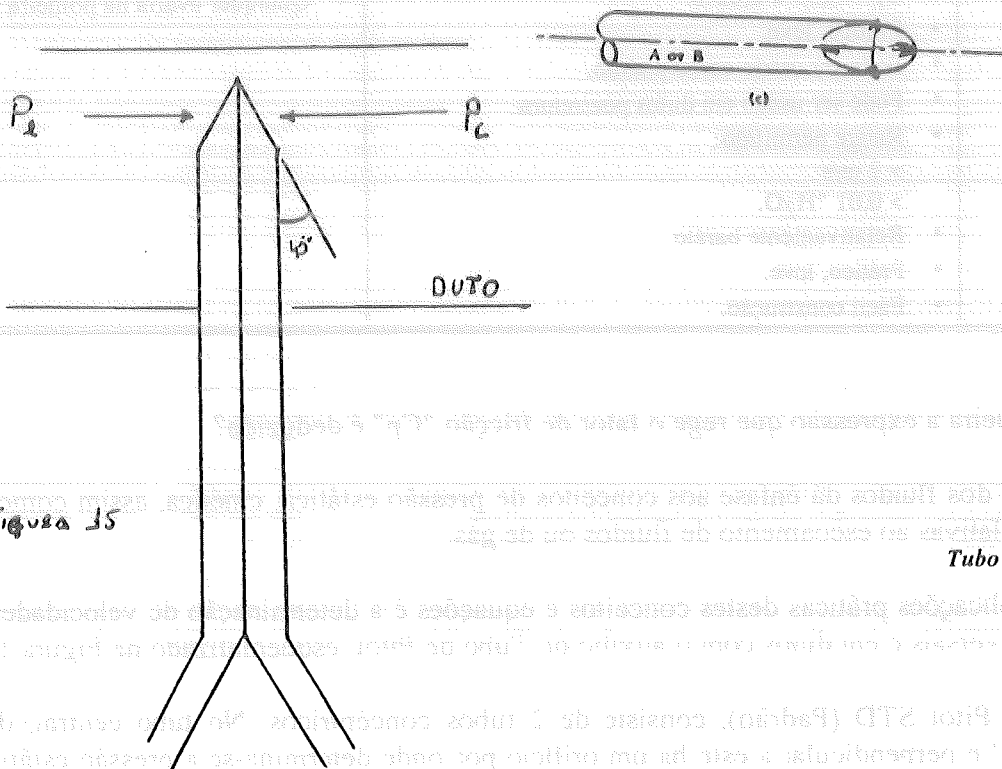


Figura 15

Figura 15 -
Tubo de Pitot "Cobra"

VAMOS ENTÃO FORNECER ALGUMAS REFERÊNCIAS SOBRE ESTES PITOTS

<i>Tubo de Pitot</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Padrão (Standard)	<ul style="list-style-type: none"> • $C_p = 0,99 \pm 0,01 \%$. • Prático, leve. • Range permitido $> 21 \text{ m/s}$ $< 0,01 \text{ "H}_2\text{O}$. • Usado como padrão para calibrar outros Pitots. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não pode ser utilizado em dutos poeirentos, somente em laboratórios. • Muito caro. • Difícil calibração. • Diâmetro de dutos muito grandes (3 m) é inviável. • Difícil construção.
"S"	<ul style="list-style-type: none"> • $C_p =$ depende da faixa 3 m/s $< V < 5 \text{ m/s}$ 0,7990 $< C_p < 0,9010$ 6 m/s $< V < 15 \text{ m/s}$ 0,8245 $< C_p < 0,8755$ 16 m/s $< V < 50 \text{ m/s}$ 0,7820 $< C_p < 0,9180$ Range permitido $> 3 \text{ m/s}$ $> 0,02 \text{ "H}_2\text{O}$ - pode ser usado em dutos poeirentos. - Relativamente barato. - Prático, leve. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualquer avaria na ponteira afetará o C_p. • Seu C_p varia dependendo da velocidade do fluxo. • Não pode ser usado como padrão.
"Cobra"	<ul style="list-style-type: none"> • $C_p = 0,99 \pm 0,02 \%$. • Prático, leve. • Pode ser usado como padrão. • Pode ser usado em dutos poeirentos. • Range permitido: $> 2 \text{ m/s}$ $> 0,01 \text{ "H}_2\text{O}$. • Relativamente barato. • Prático, leve. • Fácil construção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualquer avaria na ponteira afetará o C_p.

De que maneira a expressão que rege o fator de fricção " C_p " é deduzida?

A mecânica dos fluidos dá ênfase aos conceitos de pressão estática, cinética, assim como, as principais equações relativas ao escoamento de fluidos ou de gás.

Uma das aplicações práticas destes conceitos e equações é a determinação de velocidades e vazões em seções transversais e em dutos com o auxílio de Tubo de Pitot, esquematizado na Figura 13.

O Tubo de Pitot STD (Padrão), consiste de 2 tubos concêntricos. No tubo central, determina-se a pressão total e perpendicular a este há um orifício por onde determina-se a pressão estática. O tubo de

Pitot "S" (Figura 14) consta de dois tubos conectados, um em cima do outro; na parte superior, determina-se a pressão estática e na parte inferior, a pressão total ou dinâmica.

O Tubo de Pitot tipo "Cobra" (Figura 15), é igual ao do "S", diferindo em sua ponteira, disposta a 45° uma da outra; essa concepção faz com que seu "Cp" seja diferente ao do "S".

As equações básicas de aplicação do tubo de Pitot partem da famosa equação de Bernoulli.

Empregando-se esta equação nos pontos a e b conforme o esquema abaixo, temos:

$$P_b + \frac{1}{2} P V^2 + P_g Y_1 = P_a + \frac{1}{2} P V_2 + P_g Y_2$$

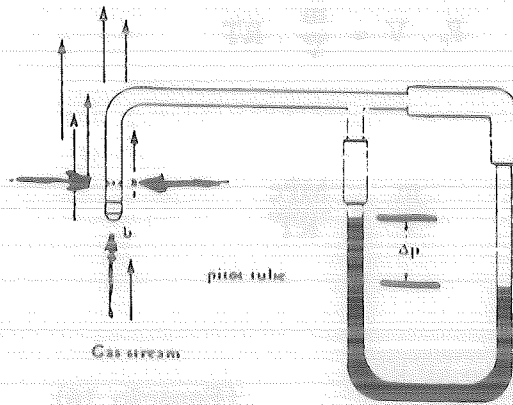
onde:

P_b = pressão no ponto b

P_a = pressão no ponto a

$V_1 = V_2 = \phi$ (nível de referência)

CETC&B - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA



$$P_b + \frac{1}{2} V^2 = P_a + \frac{1}{2} V^2$$

P = peso específico do gás.

No ponto b as moléculas de gases estão estagnadas e a energia cinética será muito pequena, portanto a velocidade de b é praticamente zero.

$$P_b = P_a + \frac{1}{2} P_g V^2$$

A energia total dentro do sistema é conservadora, então haverá um balanço de pressões.

$$P_b = P_a + P'_g P$$

onde:

P'_g = peso específico do fluido manométrico

P = diferença de pressão da coluna

Como estão em equilíbrio:

$$P_b = P_a$$

$$\frac{1}{2} V^2 = P'_g P$$

$$V = \sqrt{\frac{2 P'_g P}{\rho}} \quad (\text{Equação 15})$$

V = Seria a velocidade do gás ideal num sistema livre de perda de energia por fricção.

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \quad \text{para gás ideal}$$

$$P_c \cdot V = \frac{m}{V} \cdot RT$$

Simplificando:

$$\frac{m}{V} = \frac{MP_c}{RT}$$

Substituindo na equação 15

$$V = \sqrt{\frac{2 P'_g \Delta P RT}{MP_c}} \quad (\text{Equação 16})$$

Assim calculamos a constante $K_p = \sqrt{\frac{2 P'_g R}{P_c}}$, nas seguintes condições:

$$P'_{H_2O} = 62,428 \text{ lb/pés}^2$$

$$g = 32,174 \text{ pés/s}^2$$

$$R = 21,83 \frac{\text{in Hg pés}^3}{\text{lb mol R}}$$

$$12 \text{ in H}_2\text{O} = 1 \text{ pé}$$

Portanto:

$$K_p = \sqrt{\frac{2 (62,428) (32,174) (21,83)}{12}}$$

dando:

$$K_p = 85,486 \text{ pés/s}$$

A equação 16 pode ser escrita como:

$$V = K_p \sqrt{\frac{T_s \Delta P}{M P_c}}$$

Considerando-se a fricção provocada pelo efeito de turbulência através do tubo, corrige-se a fórmula acima com o coeficiente C_{PSTD} :

$$V = K_p C_{PSTD} \sqrt{\frac{\Delta P T_s}{P_c M}}$$

A relação entre o coeficiente de Pitot Padrão (STD) e o tipo "S" é:

$$K_p C_{PSTD} \sqrt{\frac{(\Delta P)_{STD} T}{P_c M}} = K_p C_{P_s} \sqrt{\frac{(\Delta P)_s T}{P_c M}}$$

resolvendo para C_P , obtivemos a expressão que permite comparar o tipo "S" com o tipo "PADRAO" ou "STD"; será esta a equação de calibração que usaremos:

$$C_{P_s} = C_{PSTD} \sqrt{\frac{(\Delta P)_{STD}}{(\Delta P)_s}} \quad (\text{Equação 17})$$

Assumimos $C_{PSTD} = 0,99$.

Conforme Federal Register, Norma CETESB E16.030 e Source Sampling Epa, 450/4.2.

O Anexo 3 apresenta uma planilha de calibração.

Evidentemente, para o cálculo tipo "cobra", usamos a mesma Equação 17 e trocamos "S" para "C" (cobra).

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO TUBO DE PITOT

Conforme Norma específica, é de obrigatoriedade realizar as calibrações dos tubos de Pitot em um sistema denominado velometria, isto é, um túnel de vento, que possibilita simular velocidades e vazões usuais de qualquer sistema de ventilação.

A CETESB possui este sistema que nos permite simular velocidades de 2 m/s até 50 m/s.

Fixamos os pontos em 10 velocidades, (descritas na Norma E 16030) e, desta forma, comparamos os

ΔP do Padrão ao tubo de Pitot calibrado.

Como o local não está acondicionado, nós corrigimos as temperaturas úmida e seca na pressão barométrica, ou seja, levamos em consideração a massa de vapor de água inserido na densidade do ar.

A calibração do tubo de Pitot é feita em um duto que possui um ventilador, o qual succiona o ar por um bocal denominado de difusor.

No sistema, há vários dispositivos com o intuito de formar um perfil de velocidades sem perturbações, ou seja, manter o número de Reynolds quase constante e, sempre que possível, um fluxo laminar.

O ponto de calibração deve estar sempre que possível a uma determinada distância do bocal do ventilador de no mínimo $8D$ (D = diâmetro do duto)

Divide-se a seção e anota-se a cada ponto estipulado a pressão de velocidade ou " ΔP " conforme Figura 16, que mostra o esquema dos dois Pitots, o "Padrão" e "S".

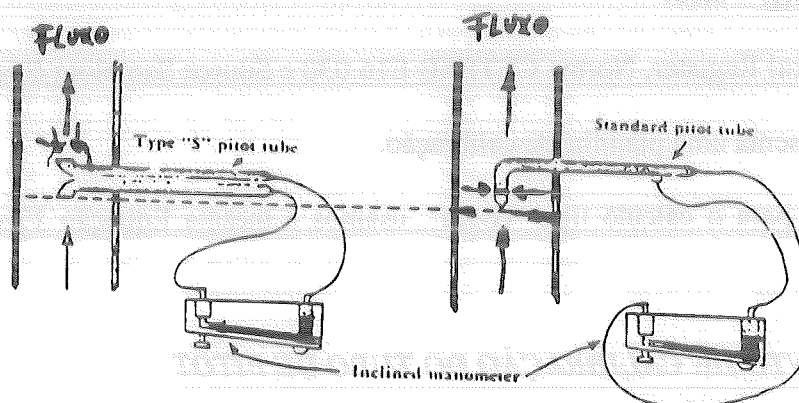
Registra-se os ΔP 's e P estática de ambos, em cada velocidade já estabelecida.

Verifica-se que os tubos de Pitot são calibrados juntamente com a sonda mais boquilha, sendo o último dispositivo trocado conforme a velocidade imposta.

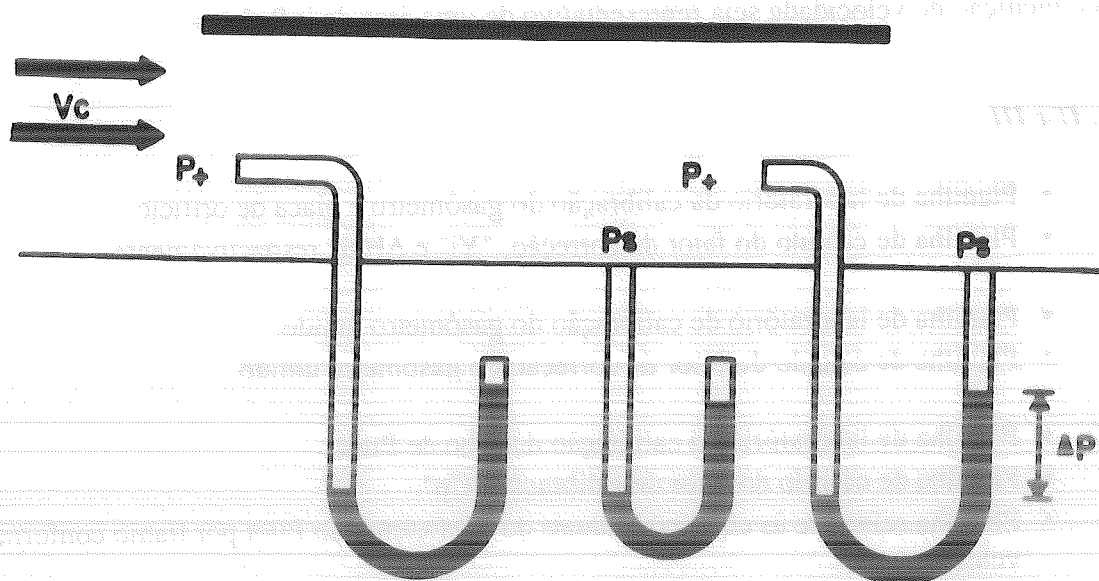
As dimensões do diâmetro das boquilhas usadas são de: $1/8"$; $1/4"$; $3/8"$ e $1/2"$.

No Anexo II estão as planilhas de calibração.

Segue abaixo a Figura 16.



COMPONENTES DE PRESSÃO TOTAL



CEPESS - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

Figura 16 - Esquema dos Pitots "Padrão" e "S"

MEDIÇÃO DE VAZÃO COM TUBO DE PITOT

Com um tubo de Pitot, mede-se normalmente a velocidade pontual de uma corrente fluida.

É possível, entretanto, fazer uma exploração das velocidades locais de vários pontos de uma canalização fechada e aplicar a estes valores um tratamento adequado para deduzir a vazão.

Durante a exploração, é necessário assegurar-se que a vazão não mude, exigindo-se para tanto, um tubo de Pitot fixo que meça uma velocidade de referência.

Para uma medição precisa em tubulação cilíndrica, deve-se proceder uma exploração ao longo de vários raios de um mesmo plano, formando entre si, ângulos iguais.

No mínimo 4 raios são recomendados.

O tubo de Pitot de referência deve ficar a $0,7 R$ de seu centro no mesmo plano dos raios onde se processa a exploração, numa bissetriz de raios consecutivos.

Uma outra localização possível do tubo de Pitot de referência, é no centro da tubulação, suficientemente longe do plano de medição, para que não haja interferências hidrodinâmicas.

Para uma medição precisa em canalização de uma seção retangular, a exploração será feita ao longo de coordenadas cartesianas num plano determinado.

O tubo de Pitot de referência poderá ficar geralmente no plano de medição, num ponto que não interfira nas coordenadas de exploração.

Vários pontos de medição serão escolhidos ao longo de cada raio ou coordenada. Admitir-se-á que cada ponto de medição de velocidade seja representativo de uma área de influência.

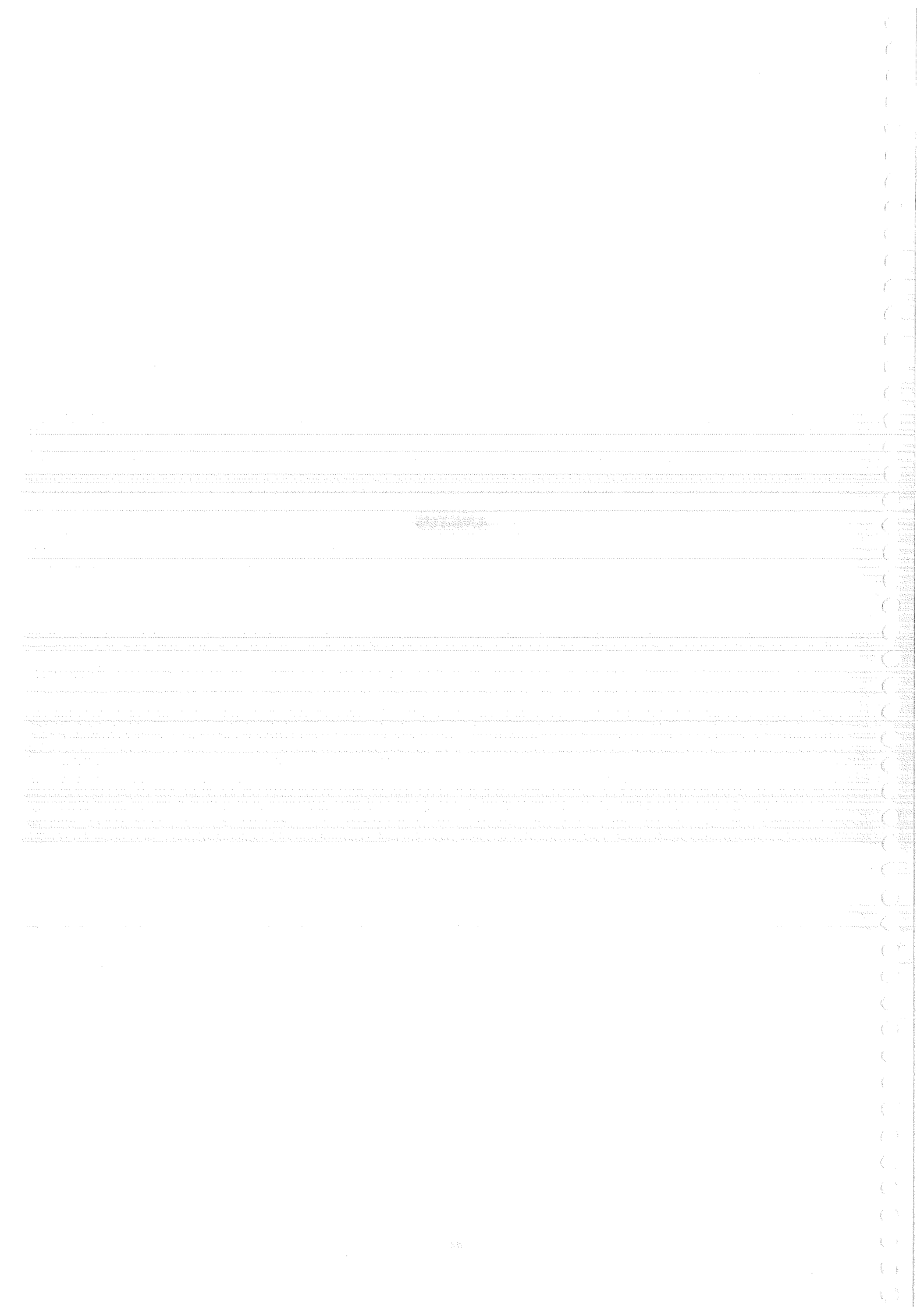
ANEXOS I, II e III

- ANEXO I
- Planilha de laboratório da calibração do gasômetro e placa de orifício.
 - Planilha de cálculo do fator de correção, " Y_i " e $\Delta H@$, respectivamente.
- ANEXO II
- Planilha de laboratório de calibração do gasômetro úmido.
 - Planilha de cálculo do fator de correção do gasômetro úmido.
- ANEXO III
- Planilha de laboratório da calibração do tubo de Pitot
 - Planilha de cálculo do fator de calibração " C_p ".
 - Planilha referente às condições ideais do coeficiente do Pitot por tramo conforme a velocidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Curso de Amostragem em Chaminé - Joseph McCain - Head, Environmental Physics, Section - Southern Research Institute, Berminghan AL, WA.
2. Principles of Unit Operations - A. S. Forest, L. A. Wenzel, L. B. Andersen. - Department of Chemical Engineering, Lehigh University - Bethlehem, Pennsylvania
3. Atmospheric Sampling - Office of Air Water Programs, Air Pollution - Training Institute - North Caroline
4. Murray, R. C., et al - Air Pollution Engineering Manual - U. S. Environmental Protection Agency - Danielson, J. A., ed: 1973
5. Manual de medição de vazão - Gerard J, Delmei
6. Engenharia de Ventilação Industrial - A. L. S. Mesquita, F. A. Guimarães, N. Nefusi
7. Mechanical Engineering Practice - Shoop and Tuve, 4th Edition
8. Fluid Dynamics - Hughes and Brighan.
9. Apostila do Curso de Amostragem em Chaminé - Eng^o Vincenzo Rivelli.

ANEXOS



CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO SECO E PLACA DE ORIFÍCIO - EQUIPAMENTOS DE AMOSTRAGEM DO TIPO RAC E ANDERSEN

Empresa: _____ NPPE

Número do equipamento: _____ Medidor _____
Orifício _____

Data: ____ / ____ / ____

Operadores: _____ / _____ Responsável: _____

< > H MMH ₂ O "H ₂ O	Volume úmido (L) e (ft ³)	Volume seco (L)	Temperatura úmido		Temperatura seco entrada		Temperatura seco saída		Tempo minutos
			(C)	(F)	(C)	(F)	(C)	(F)	
10 .39	146.95248 5								
25 .98	146.95248 5								
40 1.57	293.90496 10								
50 1.97	293.90496 10								
75 2.95	293.90496 10								

Pressão barométrica: _____ "HG: _____ mm HG: _____

Observação:

Não esquecer que devido ao fator de correção do Wet ser de 1.0378, 5 e 10 ft³ correspondem respectivamente a 5.189 e 10.378 ft³.

O volume do úmido que está em litros já está aplicado o fator de correção de 1.0378.

**CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO SECO E PLACA DE ORIFÍCIO -
EQUIPAMENTOS DE AMOSTRAGEM DO TIPO RAC E ANDERSEN OU NACIONAL**

Empresa: _____ NPPE

Número do equipamento: _____ Medidor _____

Orifício _____

Data: ____ / ____ / ____

Operadores: _____ / _____ Responsável: _____

<> H MMH ₂ O "H ₂ O	Volume úmido (L) e (ft ³)	Volume seco (L)	Temperatura úmido		Temperatura seco entrada		Temperatura seco saída	
			(C)	(F)	(C)	(F)	(C)	(F)
10	146.95248							
.39	5.189							
25	146.95248							
.98	5.189							
40	293.90496							
1.57	10.378							
50	293.90496							
1.97	10.378							
75	293.90496							
2.95	10.378							

Temperatura seco média		Tempo (minutos)	Fator de correção "Y"	<> H@ MMH ₂ O	FATORES PERMITIDOS	
(C)	(F)				<> H@ Mínimo:	
					36.576 mm H ₂ O	
					Máximo: 56.896 mm H ₂ O	
					Mínimo: 1.44" H ₂ O	
					Máximo: 2.24" H ₂ O	
					Y" Mínimo: .9600	
					Máximo: 1.0400	

Pressão barométrica: _____ "HG: _____ mm HG: _____

Observação: Esta calibração é feita com 5 e 10 ft³, que corresponde a 5.189 e 10.378 ft³ respectivamente, isto devido ao fator de correção do Wet ser de 1.0378.

ANEXO II
CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO ÚMIDO

[Faint, illegible text covering the majority of the page, possibly bleed-through from the reverse side.]

CÁLCULO REFERENTE À CALIBRAÇÃO DE GASÔMETRO ÚMIDO

A = Média do volume do equipamento em litros _____ (Ve L)
B = Média do volume do equipamento em pés cúbicos _____ (Ve ft³)
C = Média da temperatura do dispositivo em graus Celsius _____ (Td ° C)
D = Média da temperatura do equipamento em graus Fahrenheit _____ (Te ° F)
E = Média do deslocamento de pressão do dispositivo _____ <> Pd "H₂O
F = Média do deslocamento de pressão do equipamento _____ <> Pe "H₂O
G = Média do volume do dispositivo em litros _____ (Vd L)
 Temperatura ambiente (° C) = _____ = H
 Temperatura ambiente (° F) = H x 1,8 + 32 = _____ = I
 Pvibs = "H" convertido em psia, utilizando tabela = _____ = J

TABELA DE CONVERSÃO

° C	Psia
25.0	0.4593
26.0	0.4893
27.0	0.5211
28.0	0.5436
29.0	0.5784
30.0	0.6152
31.0	0.6541
32.0	0.6951
33.0	0.7236
34.0	0.7699
35.0	0.8153

Pressão barométrica ("Hg) = _____ = K
 Td (° F) = C x 1,8 + 32 = _____ = L
 Ve (ft³) = B x 28.32 = _____ = M
 Pvsatd = E / 13.6 / 0,0334 = _____ = N (Psia)
 Pvsate = F / 13.6 / 0,0334 = _____ = O (Psia)
 <> Pvd = N - J x 0,0334 = _____ = P ("Hg)
 <> Pve = O - J x 0,0334 = _____ = Q ("Hg)

$$Vrd = \frac{G \times (459.7 + I) \times [K - (E / 13.6) - P]}{(459.7 + I) \times K} = R$$

$$Vrd = G \times (459.7 + I) \times [K - (E / 13.6) - P] / (459.7 + I) \times K$$

$$Vre = A \times (459.7 + D) \times (K - (F / 13.6) - Q) / (459.7 + I) \times K$$

$$Vre = \frac{A \times (459.7 + D) \times (K - (F / 13.6) - Q)}{(459.7 + I) \times K} = S$$

$$Vre = M \times (459.7 + D) \times (K - (F / 13.6) - Q) / (459.7 + I) \times K$$

$$Vre = \frac{M \times (459.7 + D) \times (K - (F / 13.6) - Q)}{(459.7 + I) \times K} = T$$

$$\text{Fator de correção} = R / S = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad (P / \text{Equip. L})$$

$$\text{Fator de correção} = R / T = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad (P / \text{Equip. ft}^3)$$

$$\text{Desvio padrão} = (A - R) / R = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad (P / \text{Equip. L})$$

$$\text{Desvio padrão} = (M - R) / R = \frac{\quad}{\quad} = \quad \quad \quad (P / \text{Equip. ft}^3)$$

CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO ÚMIDO NPPE

Nº do Equipamento: _____ **Temp. Amb.:** _____ ° C _____ ° F
Empresa: _____ **P. bar.:** _____ "HG
Data: ____ / ____ / ____
Operadores: _____ / _____ **Responsável:** _____

NÚMERO DE ENSAIOS	1	2	3	4	5
Vd (litros)					
Ve (litros)					
Ve (ft ³)					
Td (C)					
Te (C)					
Te (F)					
<> Pe ("H ₂ O)					
<> Pd ("H ₂ O)					

PLANILHA DE CÁLCULO DO GASÔMETRO ÚMIDO - NPPE

Nº do Equipamento: _____

Empresa: _____

Data: ____ / ____ / ____

Operadores: _____ / _____ Responsável: _____

	<i>Ve (L)</i>	<i>Ve (ft³)</i>	<i>Td (C)</i>	<i>Te (F)</i>	<i><> Pd</i> "H ₂ O	<i><> Pe</i> "H ₂ O	<i>Vd(L)</i>
1							
2							
3							
4							
5							
ME							

Tamb. = _____ (C) *Tamb.* _____ (F) *Pvibs* _____ (Psia)
 (ver Tabela) = _____ *Tamb.* (F) *P. bar.* = _____ ("HG) *Td (F)* = _____
Ve (ft³) _____ (em litros) *Pvsatd* (média do <> Pd) = _____ 0 (Psia)
Pvsate (média do <> Pe) = _____ 0 (Psia) <> *Pvd* = _____ ("HG)
 <> *Pve* = _____ ("HG) *Vr d* = _____ (L) (p/ equip. em L)
Vr e = _____ (L) (p/ equip. em ft³) *Fator de Correção* = _____ (p/ equip. em L)
Fator de Correção = _____ (p/ equip. em ft³) *Desvio Padrão* = _____ (p/ equip. em L)
Desvio Padrão = _____ (p/ equip. em ft³)

PLANO DE TRABALHO DE CÁLCULO DO CARGO PROBATÓRIO

Item	Descrição	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
1	Material de consumo	100	100,00	10.000,00
2	Material de limpeza	50	50,00	2.500,00
3	Material de manutenção	20	20,00	1.000,00
4	Material de transporte	10	10,00	500,00
5	Material de comunicação	5	5,00	250,00
6	Material de segurança	3	3,00	150,00
7	Material de documentação	2	2,00	100,00
8	Material de informática	1	1,00	50,00
9	Material de energia	1	1,00	50,00
10	Material de água	1	1,00	50,00
11	Material de gás	1	1,00	50,00
12	Material de eletricidade	1	1,00	50,00
13	Material de telefonia	1	1,00	50,00
14	Material de internet	1	1,00	50,00
15	Material de outros serviços	1	1,00	50,00
16	Material de outros materiais	1	1,00	50,00
17	Material de outros serviços	1	1,00	50,00
18	Material de outros materiais	1	1,00	50,00
19	Material de outros serviços	1	1,00	50,00
20	Material de outros materiais	1	1,00	50,00

Valor Total: R\$ 15.000,00

Valor Unitário: R\$ 100,00

Quantidade: 100

Valor Total: R\$ 10.000,00

Valor Unitário: R\$ 50,00

Quantidade: 50

Valor Total: R\$ 2.500,00

Valor Unitário: R\$ 20,00

Quantidade: 20

Valor Total: R\$ 1.000,00

Valor Unitário: R\$ 10,00

Quantidade: 10

Valor Total: R\$ 500,00

Valor Unitário: R\$ 5,00

Quantidade: 5

Valor Total: R\$ 250,00

Valor Unitário: R\$ 3,00

Quantidade: 3

Valor Total: R\$ 150,00

Valor Unitário: R\$ 2,00

Quantidade: 2

Valor Total: R\$ 100,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

Valor Unitário: R\$ 1,00

Quantidade: 1

Valor Total: R\$ 50,00

ANEXO III
CALIBRAÇÃO DE TUBO DE PITOT
TIPO "S" E "COBRA"



CALIBRAÇÃO DE TUBOS DE TIPO "S" E "COBRA"
PLANILHA DE CÁLCULOS

**PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE TUBOS DE PITOT
DO TIPO "S" E "COBRA"**

Nº do Equipamento: _____ P. bar.: _____ mm HG _____ "HG
 Empresa: _____
 Data: ____ / ____ / ____ Temp. seco: _____ ° C _____ ° F
 Temp. úmido: _____ ° C _____ ° F
 Operadores: _____ / _____ Responsável: _____
 Teve reparos: Sim () Não ()

NPPE		Pitot de Calibração S. C.				Pitot		Placa de	Velocidade lida no sistema ft/min.
Ø .	Voltas	Tramo A		Tramo B		Padrão		Orifício	
Boc.		<> P	P. Est.	<> P	P. Est.	<> P	P. Est.	<> P	
Pol.		"H ₂ O	"H ₂ O	"H ₂ O	"H ₂ O	"H ₂ O	"H ₂ O	"H ₂ O	
1/2	1								
1/2	3								
3/8	7								
3/8	10								
1/4	14								
1/4	16								
1/8	32								
1/8	80								
1/8	128								
1/8	224								

CÁLCULO DO "Z" E DA VELOCIDADE REAL

$$T_s = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ \text{ C } \quad \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ \text{ F } \quad \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ \text{ R}$$

$$T_u = \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ \text{ C } \quad \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ \text{ F } \quad \underline{\hspace{2cm}} \text{ } ^\circ \text{ R}$$

$$P_{bar} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ "Hg} \times 0,0334 = \underline{\hspace{2cm}} \text{ psia (4 casas)}$$

$$d = 1.325 \times P_{bar} \text{ ("Hg)} / T_s \text{ (} ^\circ \text{ R)} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (A)}$$

$$V_{esp. H_2O} = 1/A = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (B) (5 casas)}$$

$$m. H_2O = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (C) carta psicométrica (4 casas)}$$

$$X = P_{bar} \text{ (psia)} \times V_v / p = \underline{\hspace{2cm}} \text{ (D) utilizar tabela de vapor de } H_2O \text{ saturada}$$

$$V_{esp.} = 1/D = \underline{\hspace{2cm}} = \text{(E) (6 casas)}$$

$$d = 1 + C/B + E = 1 + \underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}} + \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} = \text{(F)}$$

$$\sqrt{F} = \underline{\hspace{2cm}} = \text{(G)}$$

$$1/G = 1/ \underline{\hspace{2cm}} = \underline{\hspace{2cm}} / \underline{\hspace{2cm}} = \text{(H)}$$

$$1096.7 \times H = \underline{\hspace{2cm}} = \text{(W) (3 casas)}$$

$$W = Z = \underline{\hspace{2cm}} = \text{Fator de correção}$$

$$\text{Velocidade Real (A, B e Padrão)} = Z \times \sqrt{\Delta P} / 60 / 3.28 \text{ (A, B e Padrão)}$$

$$\text{Velocidade Real} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ m/s}$$

NOMENCLATURA

T_s = Temp. do bulbo seco

T_u = Temp. do bulbo úmido

$P. bar$ = Pressão atmosférica

$V. esp.$ = Volume específico

d = Densidade do ar

$M.H_2O$ = Massa de água

TABELA DE VAPOR DE H_2O SATURADA

V_v (ft ³ /lb)	p (psia)
381.7	0.8668
370.9	0.8935
368.4	0.9000
360.5	0.9210
350.4	0.9492
340.6	0.9781

CÁLCULO DO T. E DA VELOCIDADE REAL

$T = \frac{1}{f}$ $f = \frac{1}{T}$
 $v = \lambda \cdot f$ $\lambda = \frac{v}{f}$

Onde: T = Período (s) f = Frequência (Hz) v = Velocidade (m/s) λ = Comprimento de onda (m)

Exemplo: Um som tem uma frequência de 440 Hz e uma velocidade de propagação de 340 m/s. Calcule o período e o comprimento de onda.

Solução:
 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{440} \approx 0,00227 \text{ s}$
 $\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{440} \approx 0,773 \text{ m}$

Portanto, o período é aproximadamente 0,00227 s e o comprimento de onda é aproximadamente 0,773 m.

EXERCÍCIOS		RESPOSTAS
1. Um som tem uma frequência de 500 Hz e uma velocidade de propagação de 340 m/s. Calcule o período e o comprimento de onda.	$T = \frac{1}{500} = 0,002 \text{ s}$ $\lambda = \frac{340}{500} = 0,68 \text{ m}$	
2. Um som tem um período de 0,002 s e uma velocidade de propagação de 340 m/s. Calcule a frequência e o comprimento de onda.	$f = \frac{1}{0,002} = 500 \text{ Hz}$ $\lambda = \frac{340}{500} = 0,68 \text{ m}$	
3. Um som tem um comprimento de onda de 0,5 m e uma velocidade de propagação de 340 m/s. Calcule a frequência e o período.	$f = \frac{340}{0,5} = 680 \text{ Hz}$ $T = \frac{1}{680} \approx 0,00147 \text{ s}$	
4. Um som tem uma frequência de 1000 Hz e um comprimento de onda de 0,34 m. Calcule a velocidade de propagação.	$v = \lambda \cdot f = 0,34 \cdot 1000 = 340 \text{ m/s}$	

ANEXO IV
NORMAS DA CETESB
Nº E16.030 E E2.166

termômetro com menor divisão de 1°C para medição da temperatura interna do gasômetro.

3.1.2 Cronômetro.

3.1.3 Barômetro de mercúrio ou aneróide.

3.2 Para Pitot

3.2.1 Túnel de vento, isto é, duto com um trecho reto e seção transversal uniforme provido de ventilador e regulador de vazão que assegure na seção de ensaio a faixa de velocidade necessária à calibração.

3.2.2 Pitot-padrão provido de manômetro.

3.2.3 Tubos flexíveis de borracha.

3.2.4 Paquímetro.

3.3 Para medidor de temperatura

3.3.1 Termômetro de mercúrio conforme ASTM E1.

3.3.2 Banho de gelo, com isolamento térmico, e profundidade de aproximadamente 10 cm.

3.3.3 Frasco de vidro, com profundidade de 10 cm.

3.3.4 Bico de Bunsen, tripé e tela de amianto.

3.4 Para boquilha

3.4.1 Paquímetro.

4 EXECUÇÃO DO ENSAIO

O gasômetro seco e a placa de orifício, devem ser calibrados em conjunto. As calibrações devem ser feitas a cada 20 m^3 registrados pelo gasômetro seco ou a cada 6 meses, o que ocorrer primeiro. Este período poderá ser diminuído pelo agente do órgão oficial de defesa do meio ambiente, se assim o julgar necessário.

4.1 Calibração do gasômetro seco e placa de orifício

Montar a aparelhagem como mostra a Figura 1.

Nota: O gasômetro úmido deve ser calibrado pelo menos uma vez por semestre.

4.1.1 Teste de vazamento

O teste de vazamento, tanto com pressões positivas como com negativas, deve ser feito com o gasômetro úmido desconectado do resto da

aparelhagem.

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

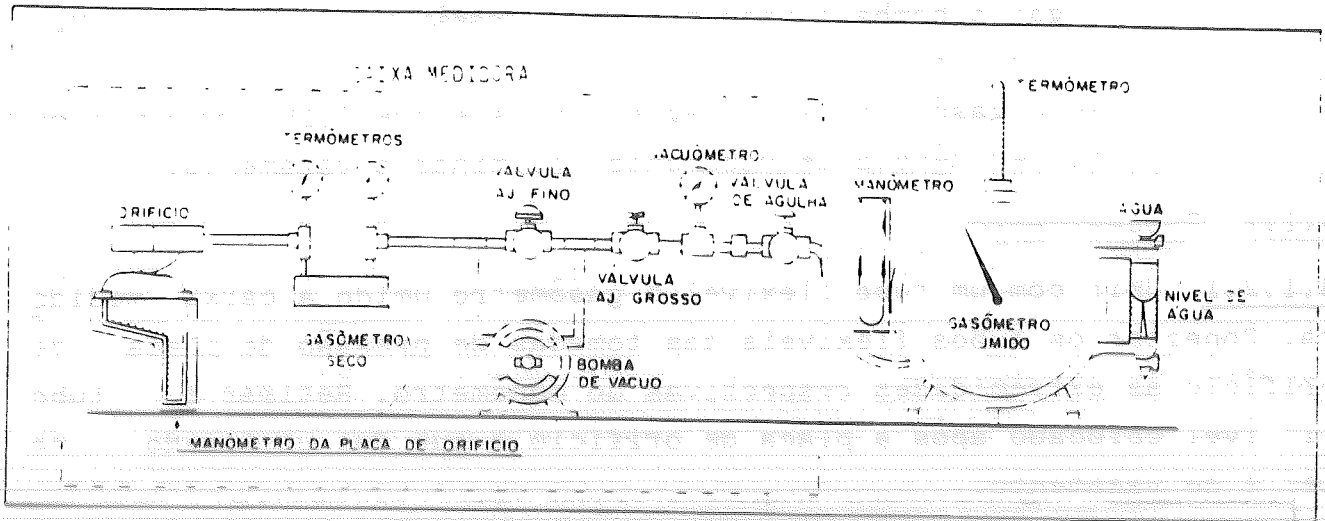


FIGURA 1 - Aparelhagem para calibração do gasômetro seco e da placa de orifício

4.1.1.1 O teste de vazamento com pressões positivas, deve ser realizado como segue:

- desconectar a mangueira da tomada de pressão posterior à placa de orifício (no sentido do fluxo). Fechar essa tomada;
- deixar aberto o lado negativo do manômetro (aquele que estava ligado pela mangueira indicada em a);
- colocar um tubo flexível na saída do tubo da placa de orifício e nele uma pinça para permitir interrupção do fluxo;
- conectar o lado positivo do manômetro à tomada de pressão anterior à placa de orifício (no sentido do fluxo);
- fechar a entrada da caixa medidora;
- abrir as válvulas de ajuste grosso e fino;
- soprar através do tubo flexível colocado após o orifício, até que o manômetro registre uma pressão de 1274 a 1764 Pa.
- fechar o tubo flexível com a pinça citada em c) de forma que o sistema se mantenha sob pressão;
- observar o manômetro por um período de 1 minuto. Não deve haver variações sensíveis no manômetro. Caso haja vazamento este deve ser eliminado.

4.1.1.2 O teste de vazamento com pressões negativas deve ser reali

zado como segue:

- a) fechar a entrada da caixa medidora;
- b) ligar a bomba e produzir uma depressão de 10 000 Pa (75 mmHg) e observar o gasômetro seco;
- c) se o gasômetro seco registrar mais que 0,15 L em um minuto (evidência de vazamento) eliminar o vazamento.

4.1.2 Procedimento

4.1.2.1 Unir com um tubo flexível o gasômetro úmido à caixa medidora. Conectar os tubos flexíveis das tomadas de pressão da placa de orifício às extremidades respectivas do manômetro. Retirar o tubo flexível colocado após a placa de orifício e que foi utilizado no teste de vazamento.

4.1.2.2 Ligar e regular a bomba de modo que o manômetro da placa de orifício indique 127 Pa (13 mm H₂O) aproximadamente. Manter assim a bomba por um período de 15 minutos para que ela se aqueça e a superfície interna do gasômetro úmido se umedeça.

4.1.2.3 Ajustar a válvula de agulha de forma que o vacuômetro na caixa medidora indique pressões entre 6666 e 13323 Pa (50 e 100 mm Hg) durante a calibração.

4.1.2.4 Anotar a pressão barométrica.

4.1.2.5 Através das válvulas de ajuste, regular a vazão de aspiração de modo que o manômetro da placa de orifício indique 98 Pa (10 mm H₂O). Simultaneamente disparar o cronômetro e efetuar a leitura inicial do gasômetro seco e úmido. Quando o gasômetro úmido indicar o volume de 0,15 m³ interromper o cronômetro e simultaneamente efetuar a leitura do gasômetro seco. Proceder da mesma forma para as outras pressões diferenciais da placa de orifício e correspondentes volumes a serem lidos no gasômetro úmido. Registrar os dados numa tabela como a da Figura 2, onde:

- Vu = volume de gás que passou através do gasômetro úmido durante a calibração, em m³
- Vs = volume de gás que passou através do gasômetro seco durante a calibração, em m³
- tu = temperatura do gás durante a calibração no gasômetro úmido, em °C
- tse = temperatura do gás na entrada do gasômetro seco, em °C

Data: Calibrado por:		Volume dos gases (m ³)		Temperatura (°C)				Tempo (e) (min)	Pa
		úmido (Vu) Gasômetro	seco (Vs) Gasômetro	Gasômetro úmido (tu)	Entrada (tse)	Saída (tss)	Média (ts)		
Pressão diferencial da placa de orifício (ΔH) Pa (mm H ₂ O)	98 (10)	0,15							$\Delta H \text{ (Pa)} = \frac{0,156 \Delta H}{P_b (t_s + 273)} \left[\frac{(t_u + 273) e}{V_u} \right]^2$
	245 (25)	0,15							
	392 (40)	0,30							
	490 (50)	0,30							
	735 (75)	0,30							
								Média: Y	Média: ΔH

FIGURA 2 - Tabela para calibração simultânea da placa de orifício e do gasômetro seco

tss	= temperatura do gás na saída do gasômetro seco, em $^{\circ}\text{C}$
ts	= média aritmética de tse e tss, em $^{\circ}\text{C}$
ΔH	= pressão diferencial do orifício, em Pa
Y_i	= fator de correção do gasômetro seco, em cada uma das seis tomadas, adimensional
Y	= média aritmética dos seis Y_i do gasômetro seco, adimensional
$\Delta H @ i$	= pressão diferencial no orifício em cada tomada, caso por ele passasse uma vazão de $0,01979 \text{ Nm}^3/\text{min}$, de ar na condição normal (0°C e 101325), em Pa
$\Delta H @$	= média aritmética dos seis $\Delta H @ i$ do orifício, em Pa
e	= duração de cada tomada, em min
Pb	= pressão barométrica, em Pa

4.1.2.6 Se os valores de Y_i estiverem dentro da faixa de $0,9600 < Y_i < 1,0400$, adotar o valor de Y como fator de correção do gasômetro seco. Caso contrário, rejeitar o gasômetro.

4.1.2.7 Se os valores $\Delta H @ i$ forem tais que $0,3585 \text{ kPa} < \Delta H @ i < 0,5576 \text{ kPa}$ ($36,576 \text{ mm H}_2\text{O} < \Delta H @ i < 56,896 \text{ mm H}_2\text{O}$) adotar o valor de $\Delta H @$ como fator de correção da placa de orifício. Caso contrário rejeitar a placa.

4.2 Calibração do Pitot

O Pitot deve ser calibrado pelo menos uma vez a cada período de seis meses e toda vez que sofrer qualquer avaria. Recomenda-se que, sem pre que possível, essa calibração seja feita em conjunto com o gasômetro seco e a placa de orifício.

4.2.1 Velocidade do fluxo de calibração

A calibração do Pitot pode ser realizado a:

- uma única velocidade de fluxo gasoso de aproximadamente 15 m/s , o que confere ao Pitot uma precisão de $\pm 3\%$ para velocidades maiores que 5 m/s e de $\pm 6\%$ para velocidades de 3 a 5 m/s ;
- diferentes velocidades, dentro da faixa de utilização do Pitot. Este procedimento confere ao Pitot maior precisão que o anterior.

4.2.2 Porcentagem de bloqueio

O conjunto sonda-Pitot, quando calibrado em túneis de pequeno diâmetro, pode bloquear parte significativa da seção transversal e com is

to afetar o fator de calibração. Para verificar o bloqueio proceder da seguinte maneira:

- calcular a área da seção projetada do conjunto sonda-Pitot com uma face aberta do Pitot posicionada no centro da seção do túnel;
- a área de bloqueio das sondas com ou sem bainhas externas (Figura 3) deve ser igual ou menor que 3% da área da seção transversal. Para se minimizar a área de bloqueio, nos casos em que estiverem próximos do limite superior permitido, pode-se deslocar o ponto de posicionamento para o final da primeira quarta parte do diâmetro.

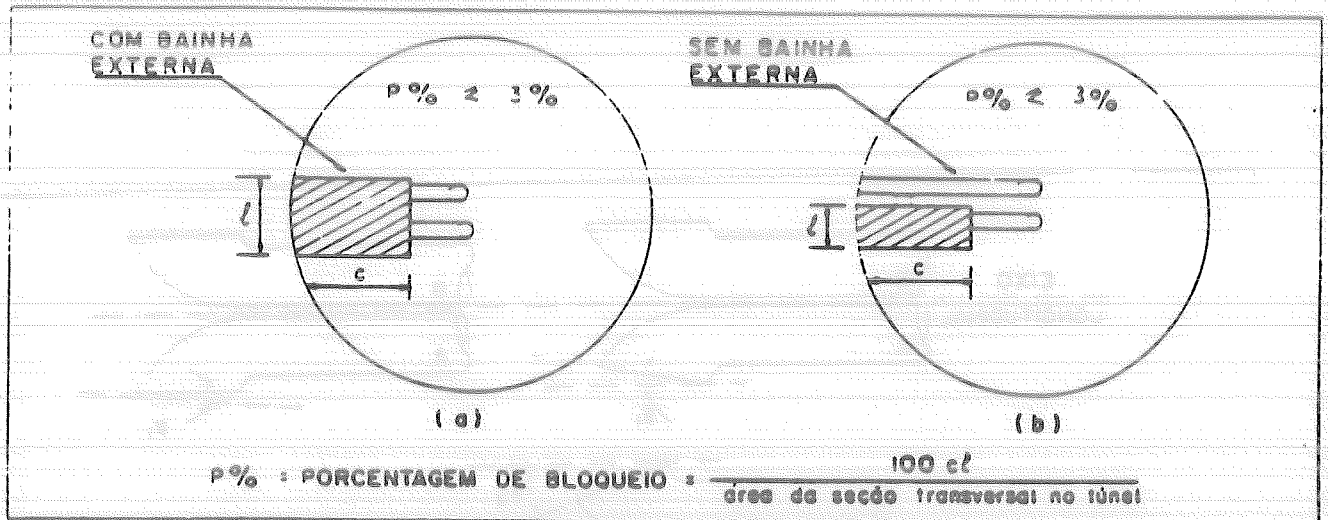


FIGURA 3 - Área da seção projetada de conjuntos sonda-Pitot S em túneis

4.2.3 Características do Pitot S e Pitot Cobra

4.2.3.1 O Pitot S e Pitot Cobra a serem calibrados devem ter inde levemente gravada em seu corpo sua identificação, assim como devem ser identificados os seus tramos.

4.2.3.2 O Pitot S deve atender às características e limites de desa linhamento mostrados nas Figuras 4 a 7.

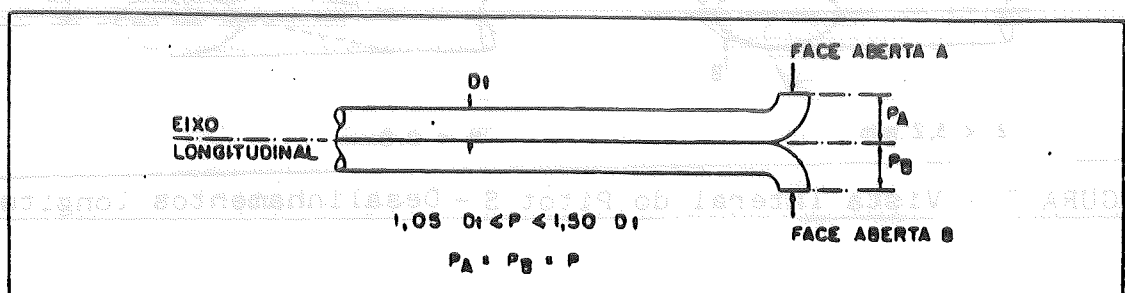


FIGURA 4 - Vista lateral do Pitot S - Características

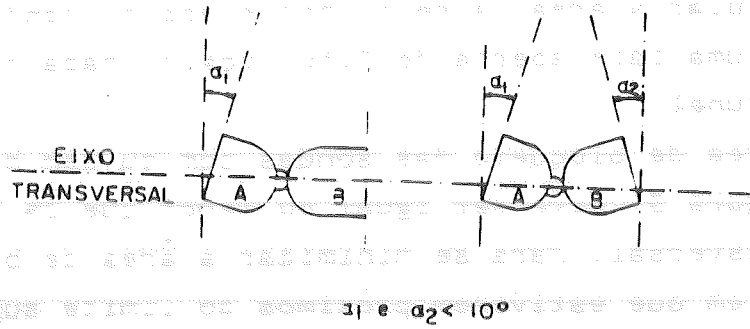


FIGURA 5 - Vista frontal do Pitot S - Desalinhamento das faces

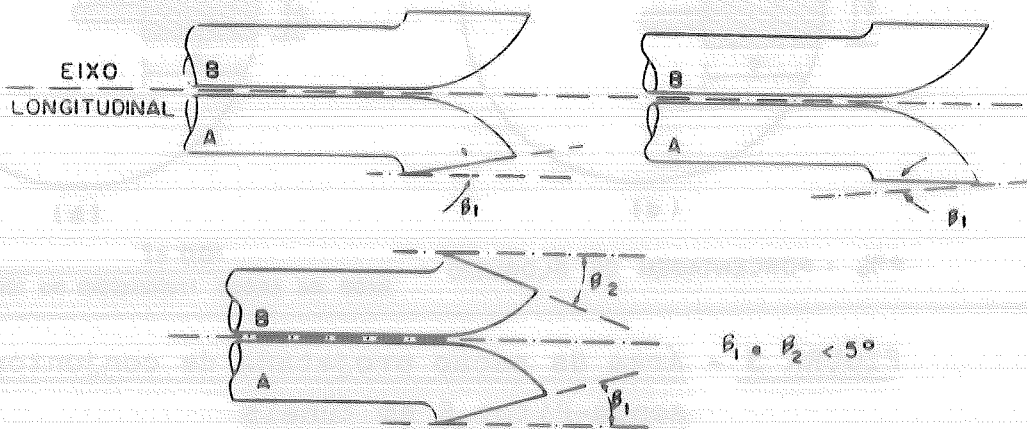


FIGURA 6 - Vista superior do Pitot S - Desalinhamento das faces

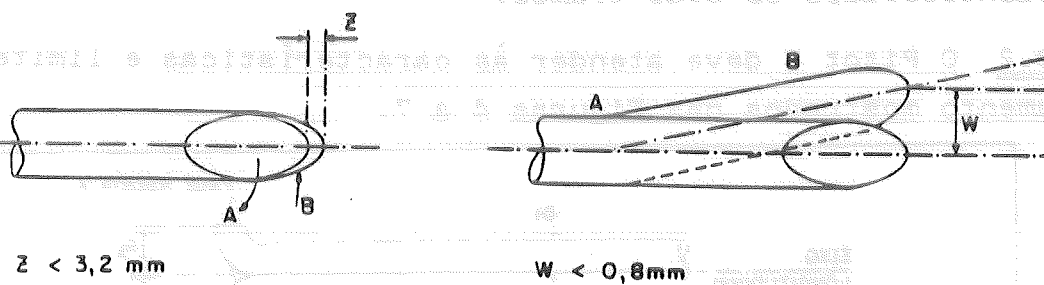
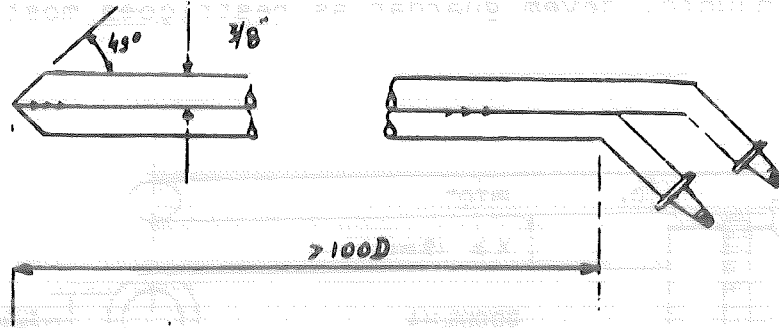


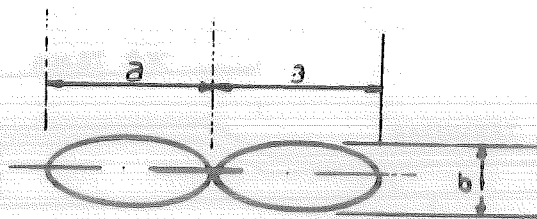
FIGURA 7 - Vista lateral do Pitot S - Desalinhamentos longitudinais

4.2.3.3 O Pitot Cobra deve atender às características e limites de desalinhamento mostrados na Figura 8.

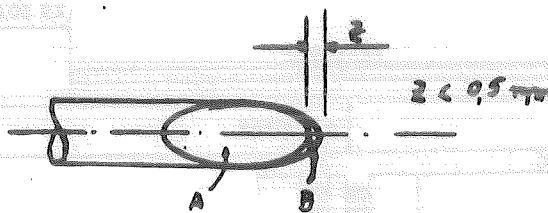
CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA



(a) Vista superior



(b) Vista frontal



(c) Vista lateral-desalinhamento das faces

FIGURA 8 - Detalhes do Pitot Cobra

4.2.3.4 Quando o Pitot S e/ou o Pitot Cobra são usados como parte de um conjunto, como na sonda de amostragem, devem manter distâncias mínimas em relação aos outros componentes para que estes não interfiram no seu funcionamento. Para se minimizar as interferências aerodinâmicas, os Pitot's com tramos de diâmetros externos entre 4,8 e 9,5 mm, no conjunto, devem guardar as restrições mostradas nas Figuras 9 a 11.

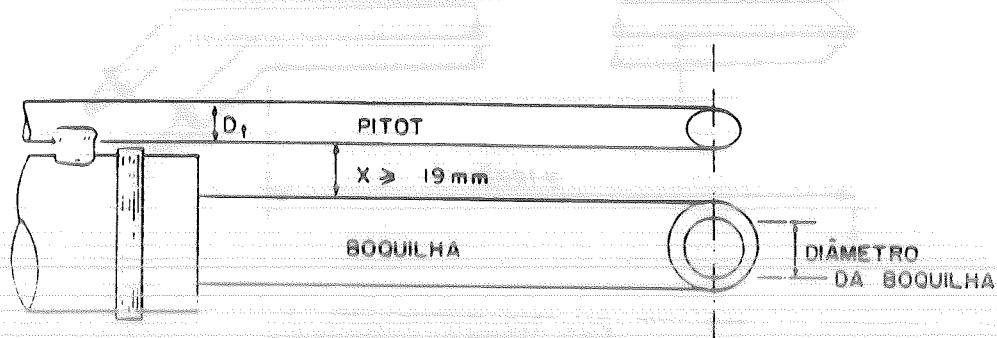


FIGURA 9 - Distância mínima requerida entre a boquilha e Pitot

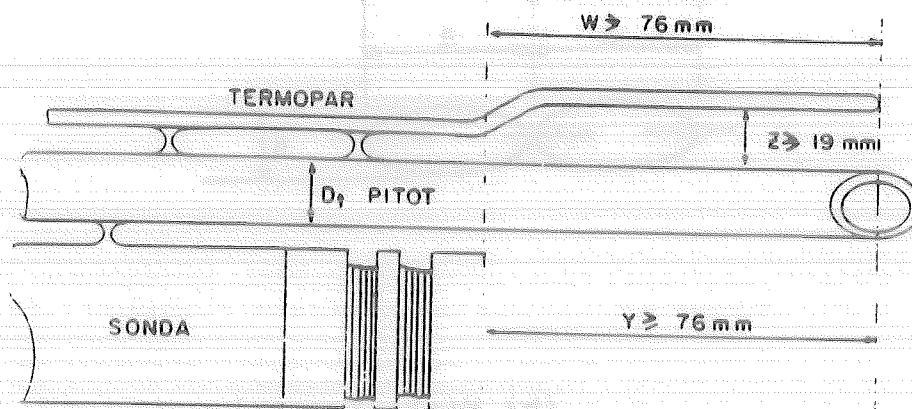


FIGURA 10 - Distâncias mínimas do termopar e bainha da sonda ao Pitot

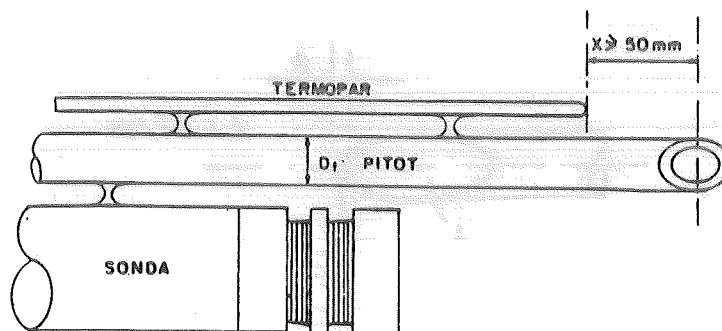


FIGURA 11 - Distância mínima entre o termopar e o Pitot, numa posição alternativa

4.2.3.5 Os Pitot's que serão usados em conjuntos com sonda e boqui-
lha devem ser calibrados em conjunto. Recomenda-se que para cada fai-
xa de velocidade se utilize boquilha adequada, como mostrado na Ta-
bela 1.

TABELA 1 - Diâmetros recomendados de boquilha versus faixa
de velocidade de calibração

Velocidade do fluxo gasoso no túnel de teste (m/s)			Diâmetro da boquilha	
			(mm)	(polegada)
3	a	5	12,70	1/2
5	a	7,5	9,52	3/8
7,5	a	12,5	6,35	1/4
12,5	a	25	3,18	1/8

4.2.4 Procedimento

4.2.4.1 Montar a aparelhagem conforme a Figura 12.

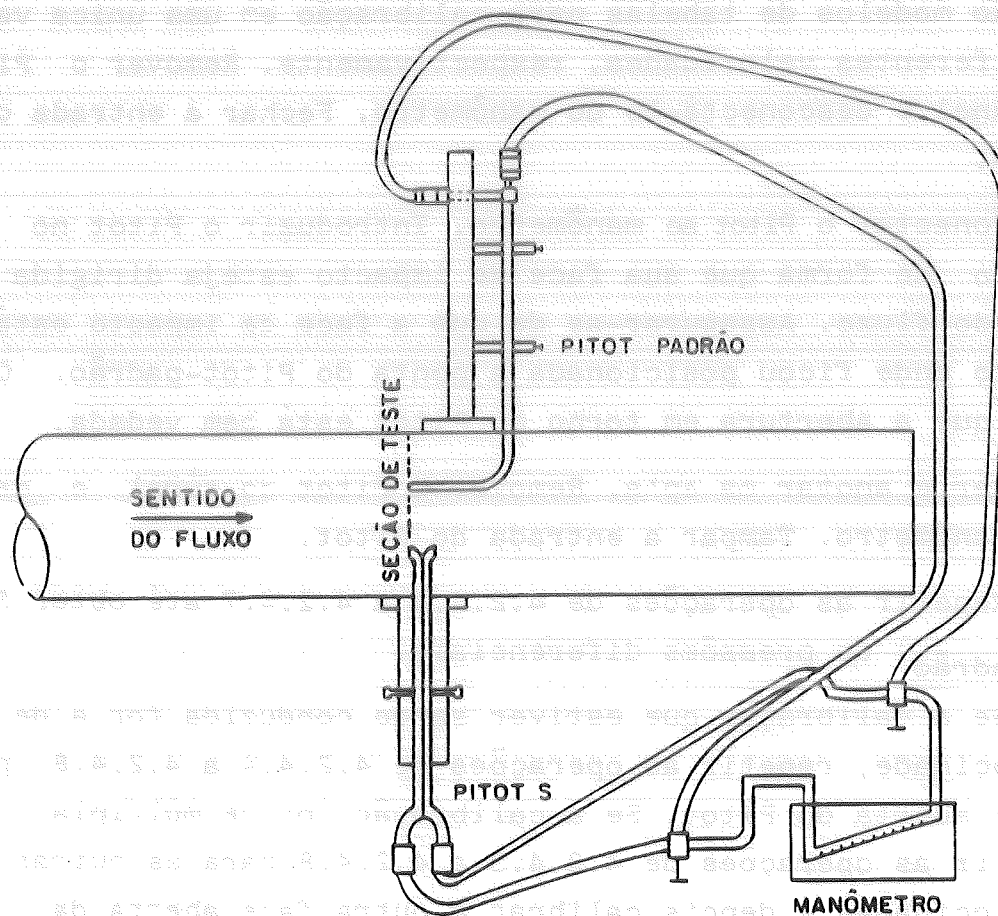


FIGURA 12 - Aparelhagem para a calibração do Pitot

Nota: Recomenda-se que o trecho que contem a seção de teste seja de material transparente, o que facilita a verificação do alinhamento dos Pitot's. Deve-se garantir na seção de teste um perfil de velocidade uniforme e um fluxo estável. Para tanto, se necessário, o túnel deverá ser provido de alinhador de fluxo ou ter seu comprimento alongado.

4.2.4.2 Inspeccionar o manômetro e os tubos flexíveis. Se necessário reparar ou substituir os componentes defeituosos. No caso de ser utilizado um manômetro diferencial, assegurar-se de que o líquido não está contaminado e de que há quantidade suficiente.

4.2.4.3 Nivelar e zerar o manômetro. Ligar o ventilador e ajustá-lo para a velocidade de fluxo gasoso requerida pela calibração e permitir que a velocidade se estabilize.

4.2.4.4 Posicionar o Pitot-padrão no centro do túnel ou próximo a ele e alinhá-lo de forma que sua abertura de impacto esteja diretamente dirigida contra o sentido do fluxo. Assegurar-se de que a abertura em torno do Pitot-padrão está bem vedada.

4.2.4.5 Anotar a pressão de velocidade do Pitot-padrão. As Figuras 13 e 14 são modelos de tabelas para calibração em uma única velocidade e em diferentes velocidades, respectivamente. Remover o Pitot-padrão do túnel e desconectá-lo do manômetro. Fechar a entrada do Pitot-padrão.

4.2.4.6 Conectar o Pitot ao manômetro. Introduzir o Pitot no túnel e alinhá-lo de forma que sua face de impacto esteja dirigida contra o sentido do fluxo. Assegurar-se de que a face de impacto está no mesmo ponto onde ficou posicionada a ponta do Pitot-padrão. Certificar-se de que a abertura em torno do Pitot está bem vedada.

4.2.4.7 Ler e anotar os Δp 's. Remover o Pitot do túnel e desconectá-lo do manômetro. Tampar a entrada do Pitot.

4.2.4.8 Repetir as operações de 4.2.4.4 a 4.2.4.7 até obter 3 pares (Δp e $\Delta p_{\text{padrão}}$) de pressões diferenciais.

4.2.4.9 Se a calibração que estiver sendo conduzida for a de uma única velocidade, repetir as operações de 4.2.4.4 a 4.2.4.8 para a outra face aberta do Pitot. Se a calibração for de múltipla velocidade repetir as operações de 4.2.4.3 a 4.2.4.8 para as outras diferentes velocidades e depois calibrar a outra face aberta da mesma forma.

Data: _____

Calibrado por: _____

Identificação do Pitot-Padrão: _____

Identificação do Pitot calibrado: _____

Calibração do tramo A

Tomada	Δp padrão Pa (mm H ₂ O)	Δp Pa (mm H ₂ O)	Cp	Desvio Cp - \overline{Cp} (A)
1				
2				
3				
\overline{Cp} (A)				

Calibração do tramo B

Tomada	Δp padrão Pa (mm H ₂ O)	Δp Pa (mm H ₂ O)	Cp	Desvio Cp - \overline{Cp} (B)
1				
2				
3				
\overline{Cp} (B)				

FIGURA 13 - Tabela de dados a serem coletados na calibração em uma única velocidade

Data:

Calibrado por:

Identificação do Pitot-padrão:

Identificação do Pitot calibrado:

Calibração do tramo A B

Conjunto*	Tomada	Δp padrão Pa (mm H ₂ O)	Δp Pa (mm H ₂ O)	C_p	\bar{C}_p	Desvio $C_p - \bar{C}_p$	\bar{v} (m/s)
A							
B							
C							
D							
E							

* Reunião de condições específicas para ajustagem das velocidades.

FIGURA 14 - Tabela de dados a serem coletados na calibração em múltipla velocidade

4.2.5 Cálculos

4.2.5.1 Calibração em uma única velocidade

Para a determinação do coeficiente do Pitot, proceder como segue:

- a) calcular o coeficiente do Pitot para cada um dos seis pa

res de pressões de velocidade (3 do lado A e 3 do lado B)

$$C_p = C_{p \text{ padrão}} \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{padrão}}}{\Delta p}} \quad (\text{eq. 1})$$

onde:

C_p = coeficiente do Pitot calculado em cada tomada, adimensional

$C_{p \text{ padrão}}$ = coeficiente do Pitot-padrão, adimensional

$\Delta p_{\text{padrão}}$ = pressão de velocidade medida pelo Pitot-padrão em cada tomada em Pa

Δp = pressão de velocidade medida pelo Pitot em cada tomada, em Pa

b) calcular \bar{C}_p (A), média aritmética dos coeficientes do tramo A, e \bar{C}_p (B), média aritmética dos coeficientes do tramo B, e determinar a diferença entre ambos;

c) calcular o desvio entre cada valor do coeficiente (C_p) do tramo A e \bar{C}_p (A) e proceder da mesma forma para o tramo B, utilizando a seguinte equação:

$$\text{Desvio} = C_p - \bar{C}_p \text{ (A ou B)} \quad (\text{eq. 2})$$

d) calcular σ , média aritmética dos desvios, para os tramos A e B do Pitot. Para cálculo de σ utilizar a seguinte equação:

$$\sigma \text{ (A ou B)} = \frac{\sum_{i=1}^3 |C_p - \bar{C}_p \text{ (A ou B)}|}{3} \quad (\text{eq. 3})$$

e) utilizar o Pitot somente se a diferença entre o \bar{C}_p (A) e \bar{C}_p (B) for igual ou menor que 0,01 e se σ (A) e σ (B) forem iguais ou menores que 0,01. Caso contrário rejei o Pitot;

f) adotar como valor do coeficiente do Pitot (C_p) o valor de \bar{C}_p .

4.2.5.2 Calibração em múltipla velocidade

Para a determinação do coeficiente do Pitot proceder como segue:

a) para cada tomada (1, 2 e 3) de cada conjunto calcular o C_p utilizando a equação 1. Calcular o \bar{C}_p , média aritmética

tica dos C_p de cada conjunto de 3 tomadas:

- b) para cada conjunto calcular o σ utilizando a equação 3 com o $\overline{C_p}$ correspondente calculado na alínea a);
- c) repetir os passos a) e b) anteriores para o outro tramo;
- d) calcular a velocidade média no ponto da seção de teste correspondente a cada conjunto do tramo A e B, utilizando a seguinte equação:

$$\bar{v} = K C_{p \text{ padrão}} \sqrt{\frac{T \overline{\Delta p}_{\text{padrão}}}{P_{\text{atm}} M}} \quad (\text{eq. 4})$$

onde:

\bar{v}	=	velocidade média no ponto da seção de teste durante as tomadas em cada conjunto, em m/s
K	=	128,96 m/s $\left[\frac{(\text{g/g mol})}{(\text{K})} \right]^{1/2}$
$C_{p \text{ padrão}}$	=	coeficiente do Pitot-padrão, adimensional (0,99)
T	=	temperatura do fluxo gasoso, em K (no caso da calibração, pode-se tomar a ambiente)
$\overline{\Delta p}_{\text{padrão}}$	=	média aritmética das três leituras do Pitot-padrão em cada conjunto, em Pa
P_{atm}	=	pressão atmosférica durante a calibração, em Pa
M	=	massa molecular do ar, em g/g mol (na calibração admitir 29 g/g mol)

Nota: Recomenda-se a construção de um gráfico $\overline{C_p} \times \bar{v}$ para os tramos A e B.

- e) utilizar o Pitot somente se, na sua faixa de utilização, todos os desvios médios (σ) dos tramos A e B de cada conjunto, calculados de acordo com a equação 3, forem iguais ou menores que 0,01 e se a diferença entre $\overline{C_p}$ do tramo A e do tramo B de um mesmo conjunto também for igual ou menor que 0,01. Caso contrário rejeitar o Pitot;
- f) adotar como valor do coeficiente do Pitot (C_p) a média aritmética dos $\overline{C_p}$ da faixa de utilização.

4.3 Calibração dos medidores de temperatura

4.3.1 Temperatura de calibração

Sempre que possível, os medidores devem ser calibrados em uma faixa de temperatura que contenha a que vai ser encontrada no campo.

4.3.2 Medidores

No caso de termopares, antes da calibração, deve-se verificar todas as ligações e, se necessário, limpar, reparar ou substituir a fiação ou uniões. Este procedimento deve ser feito também antes de todo uso em campo. De tempos em tempos, deve-se proceder a uma inspeção do potenciômetro e, no caso deste registrar temperaturas de diferentes sensores, especial atenção deve ser dada aos botões de comando.

4.3.3 Termômetros-padrão

Na calibração dos medidores deve-se utilizar como medidor de referência termômetros de mercúrio que atendam às especificações da ASTM E1.

4.3.4 Procedimento

4.3.4.1 Medidor de temperatura do borbulhador de sílica-gel

Para a calibração do medidor de temperatura do borbulhador de sílica-gel, proceder como segue:

- a) colocar o termômetro de referência e o medidor numa mistura de gelo picado e água (de preferência destilada). Assegurar-se de que ambos não tocam nas laterais do vaso. Esperar um minuto para que o equilíbrio térmico seja atingido e efetuar as leituras do termômetro de referência e do medidor, simultaneamente;
- b) retirar do banho de gelo o medidor e o termômetro de referência, secá-los e esperar que atinjam a temperatura ambiente. Efetuar as leituras simultaneamente após a estabilização térmica;
- c) o medidor poderá ser usado somente se as suas leituras diferirem do termômetro de referência no máximo de 1°C nas situações a) e b). Se a diferença for maior que 1°C o medidor deverá ser ajustado e recalibrado até que este critério seja atendido ou deverá ser feita a substituição do medidor.

4.3.4.2 Medidores de temperatura do gasômetro seco

Para a calibração dos medidores de temperatura do gasômetro seco proceder como segue:

- a) colocar os medidores e o termômetro de referência em um

banho de água a cerca de 40 a 50°C. Aguardar a estabilização e efetuar as leituras simultaneamente:

- b) retirar do banho os medidores e o termômetro de referência. secá-los e esperar que atinjam a temperatura ambiente. Efetuar as leituras simultaneamente após a estabilização térmica;
- c) comparar as temperaturas lidas nos medidores e no termômetro de referência. Em ambos os casos as leituras dos medidores não devem diferir entre si mais do que 3°C e a diferença de cada leitura em relação à do termômetro de referência não deve ultrapassar também 3°C;
- d) antes de cada uso no campo, sem remover os medidores do gasômetro, comparar as temperaturas neles registradas com a ambiente medida com um termômetro de mercúrio, as quais não devem diferir de mais de 6°C: caso contrário deverá ser feita a substituição ou reparo dos mesmos.

4.3.4.3 Medidor de temperatura da câmara aquecida

Para a calibração do medidor de temperatura da câmara aquecida, proceder como segue:

- a) para a calibração deste medidor utilizam-se como referência termômetros de mercúrio que atendam às especificações da ASTM E1;
- b) colocar o medidor e o termômetro de referência numa mistura de gelo picado e água (de preferência destilada). Assegurar-se de que ambos não tocam as laterais do vaso. Esperar um minuto para que o equilíbrio térmico seja atingido e efetuar três leituras simultâneas (no medidor e no termômetro de referência) com um intervalo de pelo menos um minuto entre pares de leituras. Anotar as leituras num formulário como o da Figura 15;
- c) retirar do banho de gelo o medidor e o termômetro de referência; secá-los e esperar que atinjam a temperatura ambiente. Efetuar três leituras simultâneas no medidor e no termômetro de referência com intervalo de pelo menos um minuto entre pares de leituras. Anotar as leituras num formulário como o da Figura 15;
- d) colocar o medidor e o termômetro de referência num béquer com água (de preferência destilada) sobre uma placa de aquecimento. Adicionar à água pérolas de vidro. Assegurar-se de que as extremidades do medidor e do termômetro

CETESB - CIA. DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL
BIBLIOTECA

Situação	Temp. lida no termômetro de referência (°C)	Temp. lida no medidor a ser calibrado (°C)	Desvio (%)	Média aritmética
Banho de gelo				
Ambiente				
Água em ebulição				

FIGURA 15 - Modelo de tabela a ser preenchida na calibração do medidor de temperatura da câmara aquecida

de referência não tocam a lateral do béquer e estão distanciadas do fundo pelo menos 5 cm. Aguardar que a água entre em ebulição; em seguida efetuar três leituras simultâneas (no medidor e no termômetro de referência) com intervalo de pelo menos um minuto entre pares de leituras. Anotar as leituras num formulário como o da Figura 15:

- e) calcular os desvios (em valor absoluto) de cada par de leituras, utilizando a seguinte equação:

$$\text{Desvio} = 100 \left| \frac{(\text{temp. referência}) - (\text{temp. do medidor})}{(\text{temp. referência})} \right|$$

- f) o medidor poderá ser usado somente se a média aritmética dos desvios em cada situação for menor do que 1.5%; caso contrário, deverá ser feita a substituição ou reparo do medidor;

4.3.4.4 Medidor de temperatura do fluxo gasoso

Para a calibração do medidor de temperatura do fluxo gasoso proceder como segue:

- a) para a calibração deste medidor utilizam-se como referên

cia termômetros de mercúrio que atendam às especificações da ASTM E1:

- b) colocar o medidor e o termômetro de referência numa mistura de gelo picado e água (de preferência destilada). Assegurar-se de que ambos não tocam as laterais do vaso. Esperar um minuto para que o equilíbrio térmico seja atingido e efetuar três leituras simultâneas (no medidor e no termômetro de referência) com um intervalo de pelo menos um minuto entre pares de leituras. Anotar as leituras num formulário como o da Figura 16:

Situação	Temp. lida no termômetro de referência (°C)	Temp. lida no medidor a ser calibrado (°C)	Desvio (%)	Média aritmética dos desvios (%)
Banho de gelo				
Água em ebulição				
Banho de óleo ou forno				

FIGURA 16 - Modelo de tabela a ser preenchida na calibração do medidor de temperatura do fluxo gasoso

- c) colocar o medidor e o termômetro de referência num béquer com água (de preferência destilada) sobre uma placa de aquecimento. Adicionar pérolas de vidro à água. Assegurar-se de que as extremidades do medidor e do termômetro de referência não tocam a lateral do béquer e estão tão distanciadas do fundo pelo menos 5 cm. Aguardar que a água entre em ebulição. Em seguida efetuar três leituras simultâneas (no medidor e no termômetro de referência) com um intervalo de pelo menos um minuto entre pares de leituras. Anotar as leituras num formulário como o da Figura 16;

- d) para os medidores com sensores do tipo termopar repetir a alínea c) utilizando líquido com temperatura de ebulição de 150 a 250°C: um óleo de cozinha por exemplo. Caso seja utilizado outro tipo de medidor sem ser do tipo sensor de termopar pode-se utilizar outros líquidos com pontos de ebulição na temperatura máxima em que o medidor vai ser utilizado. Para estas temperaturas também podem ser utilizados fornos que alcancem as temperaturas desejadas. Anotar as leituras num formulário como o da Figura 16;
- e) calcular os desvios (em valor absoluto) de cada par, utilizando a seguinte equação:

$$\text{Desvio} = 100 \left| \frac{(\text{temp. referência}) - (\text{temp. do medidor})}{(\text{temperatura de referência})} \right|$$

- f) construir o gráfico "Temperatura de referência x Temperatura no medidor";
- g) se a média aritmética dos desvios em cada situação for menor do que 1,5% utilizar o gráfico para as temperaturas fora da faixa de calibração; e para as temperaturas dentro da faixa utilizar diretamente os valores lidos no medidor;
- h) no caso da média aritmética dos desvios em cada situação ser maior do que 1,5% deverá ser feita a substituição ou reparo do medidor.

4.4 Calibração de boquilhas

Antes de conduzir a calibração proceder a uma inspeção visual da entrada da boquilha para verificar a existência de algum tipo de deformação ou corrosão e, em caso positivo, a boquilha deverá ser reparada previamente. Para esta calibração deve-se utilizar paquímetro. A boquilha deve ser calibrada semestralmente e toda vez que sofrer qualquer avaria.

4.4.1 Procedimento

4.4.1.1 Proceder à leitura de quatro diâmetros internos defasados de aproximadamente 45°C.

4.4.1.2 Calcular a diferença entre o maior e o menor dos diâmetros.

4.4.1.3 Se a diferença calculada em 4.4.1.2 for menor ou igual a 0,1 mm, calcular a média aritmética dos quatro diâmetros e adotar esta

como diâmetro da boquilha (Db) a ser utilizado nos cálculos de amostragem. Caso contrário a boquilha deverá ser reparada e recalibrada. A Figura 17 é um modelo de tabela a ser utilizada na calibração de boquilha.

Identificação da boquilha	Diâmetros lidos				Diferença entre o maior e o menor diâmetro (mm)	Db (mm)
	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	D4 (mm)		

FIGURA 17 - Modelo de tabela a ser utilizada na calibração de boquilha

5 RESULTADOS

Do Relatório deve constar, no mínimo:

- data do ensaio;
- o número desta Norma;
- nome e assinatura do responsável;
- pressão e temperatura do ambiente;
- identificação¹ do equipamento calibrado;
- expressão dos resultados, como segue:

- no caso de gasômetro seco, indicar seu fator de correção Y;
- no caso de placa de orifício, indicar seu fator de correção ΔH_Q ;
- no caso do Pitot, indicar o coeficiente C_p de cada tramo e indicar se a calibração foi numa única velocidade ou em múltipla velocidade;
- no caso dos medidores de temperatura do borbulhador de sílica-gel, do gasômetro seco e da câmara aquecida, indicar se os mesmos atendem aos requisitos de tolerância;
- no caso do medidor de temperatura do fluxo gasoso, fornecer a curva de calibração;
- no caso da boquilha, indicar seu diâmetro Db.

¹ Nota: O setor que na CETESB calibra estes equipamentos tem como procedimento normal executar uma identificação própria em cada equipamento calibrado.

CETESB	GASÔMETRO ÚMIDO PARA AFERIÇÃO DE MEDIDORES DE VOLUME DE GASES - CALIBRAÇÃO	E2.166
	Método de ensaio	ABR/92

SUMÁRIO	Pág.
1 Objetivo.....	1
2 Definição.....	1
3 Aparelhagem.....	1
4 Execução do ensaio.....	2
5 Resultados.....	4
Anexo A - Tabela.....	7
Anexo B - Planilha de laboratório.....	9

1 OBJETIVO

Esta Norma prescreve o método de calibração de gasômetro úmido utilizado como padrão intermediário na aferição de medidores de volume de gases (gasômetros secos).

2 DEFINIÇÃO

Para os efeitos desta Norma é adotada a definição:

Gasômetro úmido

Aparelho medidor de volume de gases (ver Figura 1), formado por:

- a) câmara cilíndrica de aço inoxidável, com um orifício de entrada e outro de saída de gás, dotada de visor de nível, termômetro e nível de bolha;
- b) conjunto de pás radiais, alojado no interior da câmara e parcialmente mergulhado em água;
- c) mecanismo, registrador do volume de gás, dotado de mostrador e ponteiros, acionados pelo eixo das pás em seu movimento giratório causado pela pressão diferencial do gás.

Nota: Existem gasômetros de várias capacidades, sendo usuais as seguintes (por revolução): 7,08 L (0,25 ft³); 10 L; 28,32 L (1 ft³); 100 L.

3 APARELHAGEM

A Figura 2 apresenta esquematicamente a disposição dos aparelhos para ensaio.

3.1 Dispositivo padrão por escoamento líquido

3.1.1 Consiste em um recipiente cilíndrico vertical de fibra de vi

dro, fechado nas extremidades, com capacidade máxima de 150 L: apresenta, na parte superior, um termômetro, um manômetro de coluna d'água, um orifício de entrada dos gases e um orifício de entrada de água; na parte inferior, há uma válvula para esvaziamento do cilindro (ver Figura 2).

3.1.2 Existem duas maneiras de determinar o volume d'água escoada no dispositivo:

- a) pela massa d'água escoada desde o início até o fim do ensaio;
- b) pela diferença entre os níveis d'água, medida na escala existente ao longo do cilindro.

Nota: Normalmente, o dispositivo é projetado de tal modo que a cada milímetro da escala correspondem 100 mL d'água.

3.2 Balança

Deve ter capacidade para uma carga máxima de 200 kg. Colocada embaixo do dispositivo, para registrar a massa d'água contida nele durante o ensaio (ver Figura 2).

4 EXECUÇÃO DO ENSAIO

4.1 Nivelar o gasômetro a ser calibrado, verificar se não apresenta vazamento e se a água destilada colocada em seu interior está atingindo o nível determinado pelo fabricante.

4.2 Encher d'água o dispositivo padrão até atingir a marca superior que corresponde aproximadamente à massa de 150 kg; em seguida, utilizando uma mangueira, pôr em comunicação o orifício de saída de gases do gasômetro com o orifício de entrada de gases do dispositivo padrão.

4.3 Deixar aberta a válvula de saída d'água do dispositivo durante aproximadamente 10 segundos para que haja equalização do sistema.

4.4 Anotar a massa d'água e a temperatura do dispositivo; fixar um certo volume do gás a passar pelo gasômetro, anotando a temperatura deste.

4.5 Abrir a válvula do dispositivo.

4.6 No início e no fim do ensaio, anotar o diferencial de pressão causado pelo deslocamento da água no dispositivo e no gasômetro.

4.7 Após a passagem do volume prefixado de gás, fechar a válvula e

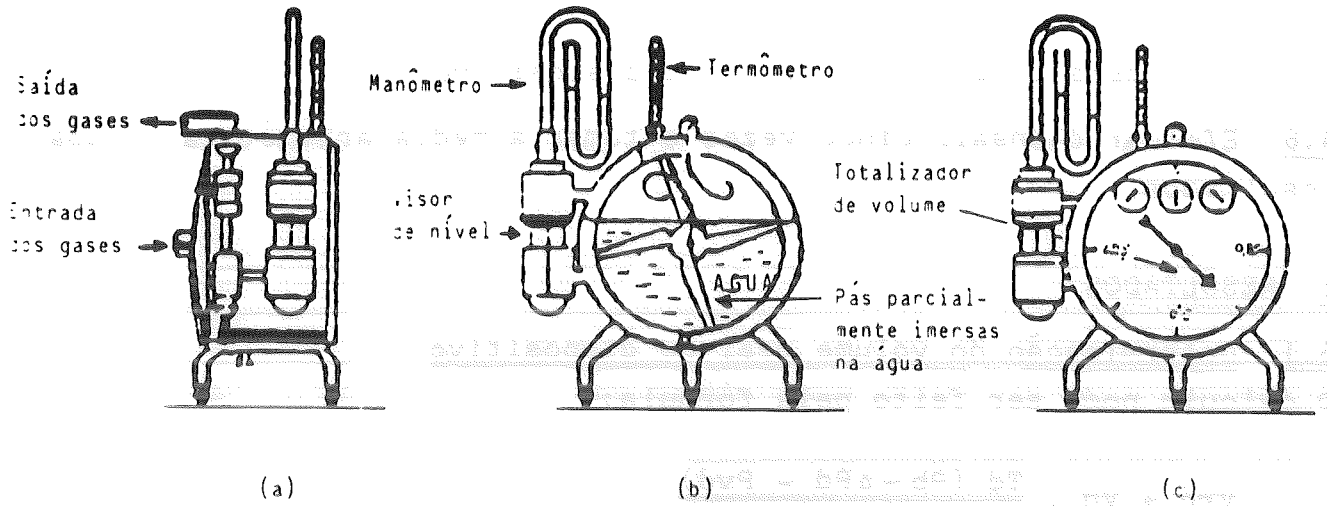


FIGURA 1 - Gasômetro úmido

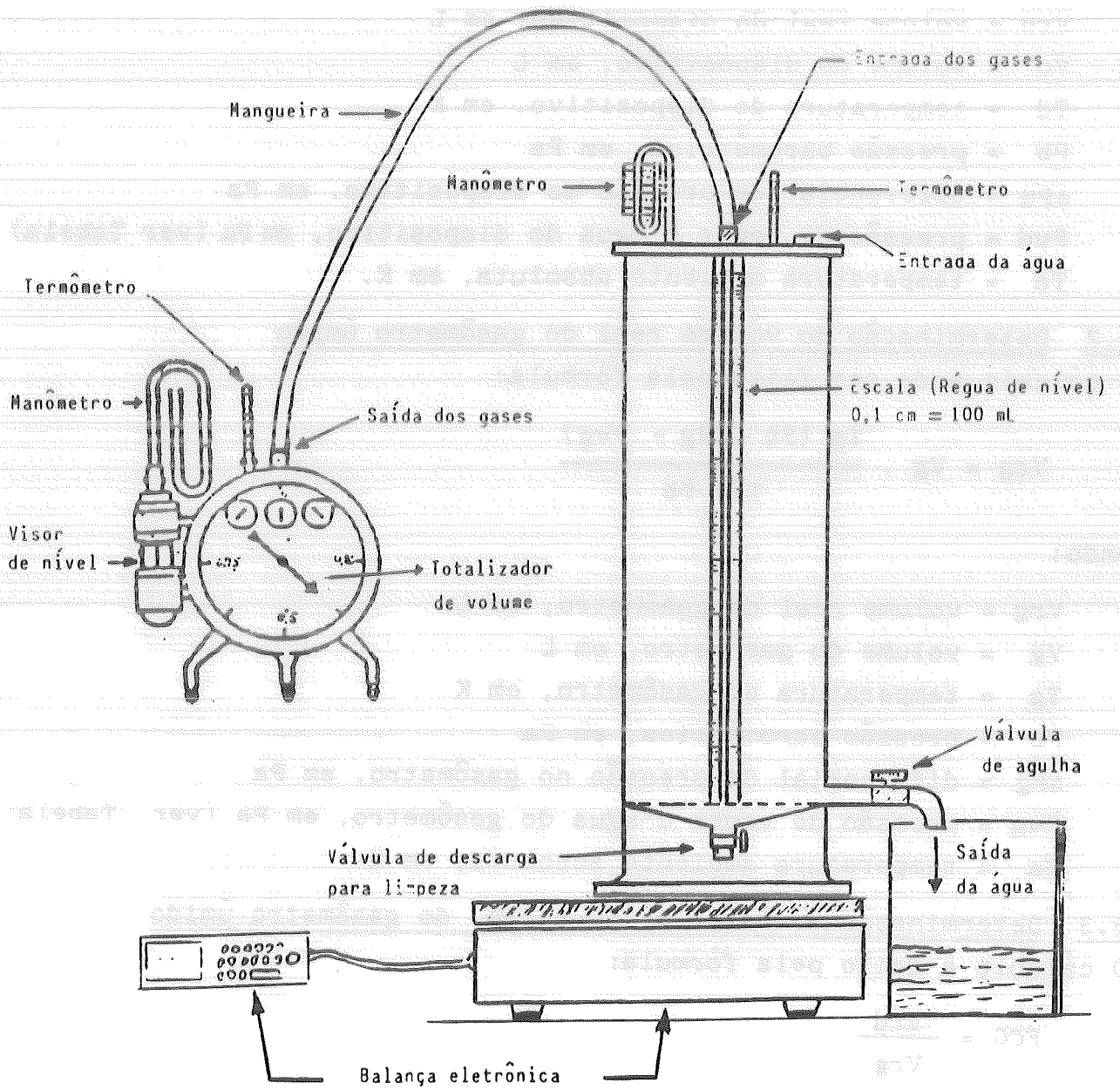


FIGURA 2 - Esquema da aparelhagem

anotar a massa d'água que restou no dispositivo.

4.8 Efetuar o ensaio cinco vezes e tomar a média aritmética dos resultados.

5 RESULTADOS

5.1 Determinação do volume real do dispositivo

O cálculo pode ser feito pela fórmula:

$$V_{rd} = V_d \cdot \frac{T_d (P_b - \Delta P_d - P_{vd})}{T_a \cdot P_b}$$

onde:

V_{rd} = volume real do dispositivo, em L

V_d = volume do dispositivo, em L

T_d = temperatura do dispositivo, em K

P_b = pressão barométrica, em Pa

ΔP_d = diferencial de pressão do dispositivo, em Pa

P_{vd} = pressão de vapor d'água do dispositivo, em Pa (ver Tabela)

T_a = temperatura ambiente absoluta, em K.

5.2 Determinação do volume real do gasômetro úmido

O cálculo pode ser feito pela fórmula:

$$V_{rg} = V_g \cdot \frac{T_g (P_b - \Delta P_g - P_{vg})}{T_a \cdot P_b}$$

onde:

V_{rg} = volume real do gasômetro, em L

V_g = volume do gasômetro, em L

T_g = temperatura do gasômetro, em K

P_b = pressão barométrica, em Pa

ΔP_g = diferencial de pressão no gasômetro, em Pa

P_{vg} = pressão de vapor d'água do gasômetro, em Pa (ver Tabela)

T_a = temperatura ambiente absoluta, em K.

5.3 Determinação do fator de correção do gasômetro úmido

O cálculo é feito pela fórmula:

$$FCG = \frac{V_{rd}}{V_{rg}}$$

onde:

FCG = fator de correção

Vrd = volume real do dispositivo, em L

Vrg = volume real do gasômetro, em L.

/ANEXO A

/ANEXO A

ORDENA

ANEXO A - TABELA

TABELA - Pressão de vapor de água saturado

Temperatura °C	Unidade: Pa (mmHg)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1226,6 (9,20)	1322,5 (9,92)	1422,5 (10,67)	1475,9 (11,07)	1553,2 (11,65)	1705,2 (12,79)	1830,5 (13,73)	1965,2 (14,74)	2034,5 (15,26)	2181,1 (16,36)
20	2333,1 (17,50)	2502,4 (18,77)	2679,8 (20,10)	2770,4 (20,78)	2963,7 (22,23)	3173,1 (23,80)	3353,0 (25,15)	3611,7 (27,09)	3730,3 (27,98)	3979,7 (29,85)
30	4243,6 (31,83)	4520,9 (33,91)	4815,6 (36,12)	4967,6 (37,26)	5286,2 (39,65)	5620,9 (42,16)	5976,8 (44,83)	6376,8 (47,83)	6542,1 (49,07)	6948,7 (52,12)
40	7375,4 (55,32)	7822,0 (58,67)	8292,6 (62,20)	8536,6 (64,03)	9048,6 (67,87)	9580,5 (71,86)	10141,8 (76,07)	10731,1 (80,49)	11036,4 (82,78)	11669,7 (87,53)
50	12333,6 (92,51)	13030,9 (97,74)	13758,8 (103,20)	14134,8 (106,02)	14920,1 (111,91)	15736,0 (118,03)	16593,3 (124,46)	17490,5 (131,19)	17954,5 (134,67)	18913,1 (141,86)
60	19915,6 (149,38)	20962,2 (157,23)	22055,5 (165,43)	22620,7 (169,67)	23786,0 (178,41)	25004,5 (187,55)	26275,1 (197,08)	27599,0 (207,01)	28280,3 (212,12)	29688,1 (222,68)
70	31154,7 (233,68)	32685,2 (245,16)	34270,4 (257,05)	35082,4 (263,14)	36775,5 (275,84)	38536,7 (289,05)	40365,9 (302,77)	42261,7 (316,99)	43244,3 (324,36)	53275,5 (399,60)
80	47341,3 (355,09)	49509,1 (371,35)	51778,3 (388,37)	-	-	-	-	-	-	-

Item	Descrição	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
01
02
03
04
05
06
07
08
09
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

ANEXO B - MODELO DE PLANILHA DE LABORATÓRIO

CALIBRAÇÃO DO GASÔMETRO ÚMIDO

Nº do equipamento: Temperatura ambiente..... K
 Empresa: Pressão barométrica: Pa
 Dia: Operadores:/.....
 Fabricante: Responsável:

Nº do ensaio	1	2	3	4	5
Vd					
Vg					
Td					
Tg					
ΔP_d					
ΔP_g					

Vd = volume do dispositivo, em L

Vg = volume do gasômetro úmido, em L

Td = temperatura do dispositivo, em K

Tg = temperatura do gasômetro úmido, em K

ΔP_d = diferencial de pressão do dispositivo, em Pa

ΔP_g = diferencial de pressão do gasômetro úmido, em Pa.

Nota: 1"Hg = 3 386,4 Pa.

